INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

LEONARDO VASCONCELOS DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

SERRA
2013

LEONARDO VASCONCELOS DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a coordenadoria do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Teixeira da Costa.

SERRA
2013

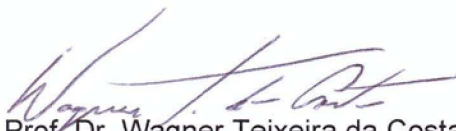
S586d Silva, Leonardo Vasconcelos da
Desenvolvimento de um Software para Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos/ Leonardo Vasconcelos da Silva. – 2013.

110 f. Il; 30cm

Orientador: Prof. Dr. Wagner Teixeira da Costa.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Engenharia de Controle e Automação, Curso Superior de Engenharia de Controle e Automação.

1. Energia fotovoltaica 2. Energia Solar – Recursos Energéticos 3. Energia Renovável 4. Software - Desenvolvimento I. Costa, Wagner Teixeira da II. Instituto Federal do Espírito Santo III. Título

CDD 621.47

LEONARDO VASCONCELOS DA SILVA

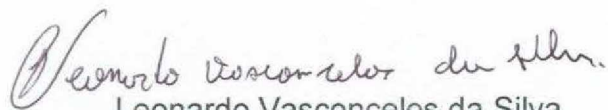
DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a coordenadoria do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovado em 18 de abril de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Wagner Teixeira da Costa
IFES – Instituto Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. M.sc. Giovani Zanetti Neto
IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Renato Tannure Rotta de Almeida
IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

Declaração do autor

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e ao autor.

Serra, 18 de abril de 2013.

Leonardo Vasconcelos da Silva

Aos meus pais, a esta Universidade, aos professores e amigos que auxiliaram minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Wagner Teixeira da Costa por contribuir com o desenvolvimento deste trabalho. A minha família que me apoiou nos momentos de dificuldades e foi compreensiva quando não estava presente. Ao Instituto Federal do Espírito Santo que possibilitou esta conquista e a toda equipe de professores que transmitiram incentivo, confiança e um sólido conhecimento. Aos amigos Lucas Selvatici Marchesi, João Pedro Quinino Filho, Vinícius Belmuds Vasconcelos, Fabiano Ferreira, Phelipe França Santos, Reynan Giacomin Borlini, Eduardo Henrique Montenegro Couto, Shirley Fernanda Beloti, Felipe Fernando de Moura, Matheus Grijó Lima, Eliã de Matos Lima, João Antônio Panceri, Daniel Augusto Vieira de Jesus, André Domingos e Gênesis Pereira Lopes da Silva por fazerem parte da turma e contribuírem com meu desenvolvimento durante estes anos. A Saulo Nazareth Barra pela contribuição na montagem do sistema fotovoltaico de validação deste trabalho.

RESUMO

Atualmente, os sistemas de energia oriundos de recursos renováveis têm avançado na missão de servir como fonte de energia principalmente em comunidades isoladas e instalações remotas. Nesse meio, os sistemas fotovoltaicos se apresentam como uma fonte promissora devido a criação de novas tecnologias e de o Sol ser uma fonte inesgotável de energia. Este trabalho demonstra o desenvolvimento de um *software* computacional para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos desenvolvido na plataforma GUIDE do MATLAB®, chamado de FOTOGERA. Foi criada uma interface amigável com o usuário para que facilite o dimensionamento e a correta instalação do sistema. Os sistemas desenvolvidos podem ser aplicados em instalações como iluminação pública, irrigação, telecomunicações, bombeamento de água, residências, entre outros, contribuindo com as atuais fontes de energia que são em sua maioria, poluidoras.

Palavras-chave: Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Energia solar. *Software*. Módulos fotovoltaicos.

ABSTRACT

Nowadays, power systems derived from renewable resources have advanced the mission of serving as a source of energy especially in isolated communities and remote installations. In this way, photovoltaic systems are presented as a promising source due to the creation of new technologies and the sun is an inexhaustible source of energy. This paper demonstrates the development of computer software for sizing photovoltaic systems developed in MATLAB® platform GUIDE, called FOTOGERA. We created a user-friendly interface that facilitates the design and proper installation of the system. The systems developed can be applied at facilities such as lighting, irrigation, telecommunications, water pumping, residences, among others, contributing to the current sources of energy that are mostly polluting.

Keywords: Design of Photovoltaic Systems. Solar Energy. Software. Photovoltaic modules.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aproveitamento da Energia Solar..19
Figura 2 - Distribuição Espectral da Radiação Solar. 27
Figura 3 - Movimento da Terra em Torno do Sol. 28
Figura 4 - Ângulos dos Raios Solares. 29
Figura 5 - Módulo Fotovoltaico com Inclinação Igual ao Ângulo de Latitude. 30
Figura 6 - Mapa de Radiação Solar Média do Brasil. 30
Figura 7 - Átomo de Silício. 31
Figura 8 - Átomo de Fósforo e Átomo de Boro. 31
Figura 9 - Junção PN. 32
Figura 10 - Célula Fotovoltaica Genérica. 32
Figura 11 - Circuito equivalente da célula. 33
Figura 12 - Associação de Células em Série. 33
Figura 13 - Associação de Células em Série – Corrente x Tensão. 34
Figura 14 - Associação de Células em Paralelo. 34
Figura 15 - Associação de Células em Paralelo – Corrente x Tensão. 34
Figura 16 - Associação de Módulos Fotovoltaicos. 35
Figura 17 - Diodo de *Bypass*. 35
Figura 18 - Diodo de Bloqueio. 36
Figura 19 - Curva I x V de um Módulo Fotovoltaico. 37
Figura 20 - Curva P x V de um Módulo Fotovoltaico. 37
Figura 21 - Ponto de Máxima Potência de um Módulo Fotovoltaico. 38
Figura 22 - Curva Caracterizada Pela Variação da Intensidade Luminosa. 38
Figura 23 - Curva Caracterizada Pela Variação da Temperatura. 39
Figura 24 - Reação Química na Bateria de Chumbo-Ácido. 40
Figura 25 - Aspecto Construtivo de uma Bateria Chumbo-Ácido. 40
Figura 26 - Auto Descarga de Baterias Chumbo-Ácido com o Tempo. 40
Figura 27 - Variação da Capacidade x Corrente de Descarga. 41
Figura 28 - Variação da Capacidade com a Temperatura. 41
Figura 29 - Curva de Carga/Descarga para uma Bateria de 12 V a 25ºC. 42
Figura 30 - Controlador Tipo *SHUNT*. 44

Figura 31 - Controlador Tipo SERIE. 44
Figura 32 – Localização do MPPT. 45
Figura 33 - Onda Senoidal, Quadrada e Retangular. 46
Figura 34 - Sistema Autônomo com Inversor. 47
Figura 35 - Conversor CC-CC. 47
Figura 36 - Sistema Autônomo. 48
Figura 37 - Sistema Conectado á Rede...49
Figura 38 - Sistema Híbrido. 49
Figura 39 - Mapa Solarimétrico de Insolação Média para o Brasil. 51
Figura 40 - Controlador de Capacidade Elevada...57
Figura 41 - Controlador de Capacidade Reduzida. 57
Figura 42 - Instalação elétrica de um Sistema Fotovoltaico. 58
Figura 43 - Elementos Básicos da Função Guide. 60
Figura 44 - GUI e Linhas de Programação. 60
Figura 45 - Ambiente Inicial para Configurações Básicas. 62
Figura 46 - Mensagem de ERRO no Ambiente Inicial. 62
Figura 47 - Ambiente de Potencial Energético e Localização.................................64
Figura 48 - Mapa de Latitude do Brasil. 65
Figura 49 - Mensagem de Erro na inserção de dados de Latitude. 67
Figura 50 - Mensagem de ERRO para valores de Radiação Média Incoerentes. ...68
Figura 51 - Mensagem de ERRO para valores de Insolação Diária Média Incoerentes. 69
Figura 52 – Ambiente de Consumo Para Sistemas Conectados. 70
Figura 53 – Mensagem de Erro Para Consumo Igual a Zero. 71
Figura 54 – Mensagem de Erro Para Tensão de Trabalho Igual a Zero.................71
Figura 55 – Mensagem de Erro Para Tensão CA Igual a Zero...............................72
Figura 56 - Ambiente de Levantamento de Carga Instalada. 72
Figura 57 - Lista de Carga Inserida pelo Usuário. 73
Figura 58 - Mensagem de Erro na inserção da Potência do Equipamento.............74
Figura 59 - Mensagem de Erro na inserção da Quantidade do Equipamento. 74
Figura 60 - Mensagem de Erro na inserção da Quantidade de Horas de Uso por Dia. 75
Figura 61 - Mensagem de Erro ao Remover Equipamento Inexistente. 75

Figura 62 - Mensagem de Erro na Inserção da Carga Instalada. 76
Figura 63 - Ambiente de Escolha do módulo Fotovoltaico......................................77
Figura 64 - Mensagem de Erro ao Remover Módulo Inexistente. 78
Figura 65 - Mensagem de Erro ao Selecionar Módulo Inexistente. 78
Figura 66 - Ambiente de escolha da Bateria...80
Figura 67 - Mensagem de Erro ao Remover Bateria Inexistente. 80
Figura 68 - Mensagem de Erro ao Inserir Tensão do Banco de Baterias inválido. ..81
Figura 69 - Mensagem de Erro ao Inserir Dias de Autonomia. 82
Figura 70 - Mensagem de Erro ao Escolher Número de Bateria inválido. 82
Figura 71 - Ambiente de Escolha do Inversor..83
Figura 72 - Ambiente de Inserir/Remover Inversores. 84
Figura 73 - Mensagem de Erro ao Remover Inversor inválido. 84
Figura 74 - Mensagem de Erro para Inversor que Não Suporta a Tensão de Trabalho. 85
Figura 75 - Mensagem de Erro para Inversor com Tensão de Saída Diferente da Tensão CA...86
Figura 76 - Mensagem de Aviso para necessidade de mais de um inversor...........87
Figura 77 – Mensagem de Erro Para Potência do Inversor Inválida. 87
Figura 78 - Mensagem de Erro para número de Inversor Escolhido Inválido. 88
Figura 79 - Ambiente de Escolha do Controlador de Carga. 89
Figura 80 - Ambiente de Inserir/Remover Controladores. 89
Figura 81 - Mensagem de Erro ao Remover Controlador inválido..........................90
Figura 82 - Mensagem de Erro para Controlador com Tensão Nominal Diferente da Tensão Exigida. 91
Figura 83 - Mensagem de Aviso para Necessidade de Mais de Um Controlador da Carga. 92
Figura 84 - Mensagem de Erro para número de Controlador Escolhido Inválido. ...92
Figura 85 - Ambiente Final – Relatório de todos os dados do Sistema. 93
Figura 86 - Relatório da Carga Instalada Inserida Pelo Usuário.............................94
Figura 87 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CA e CC com mais de um controlador. 94
Figura 88 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CA e CC com um controlador. 95

Figura 89 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CC com mais de um controlador. 95
Figura 90 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CC com um controlador. 96
Figura 91 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CA com mais de um controlador. 96
Figura 92 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CA com um controlador. 97
Figura 93 - Esquema de um Sistema autônomo sem armazenamento CA e CC. 97
Figura 94 - Esquema de um Sistema autônomo sem armazenamento CC. 97
Figura 95 - Esquema de um Sistema autônomo sem armazenamento CA. 98
Figura 96 – Ambiente de Cálculo do Retorno do Investimento. 99
Figura 97 - Esquema de um Sistema interligado a rede elétrica. 100
Figura 98 – Mapa de Ângulo de Correção da Direção Norte. 101
Figura 99 - Mensagem de Erro para Dados Incoerentes. 102
Figura 100 – Esquema elétrico do Sistema Fotovoltaico de Validação. 106
Figura 101 – Relatório Final do Sistema Fotovoltaico de Validação. 107
Figura 102 – Módulo Fotovoltaico do Sistema de Validação. 107
Figura 103 – Sistema Fotovoltaico de Validação. 108

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ampére.
Ad	Coeficiente de Autodescarga da Bateria.
At	Autonomia do Banco de Baterias.
CA	Corrente Alternada.
Cb	Capacidade do Banco de Baterias.
CC	Corrente Contínua.
Cmax	Capacidade Máxima do Sistema.
E	Energia total da Carga instalada.
Eprod	Energia Produzida pelo Módulo Fotovoltaico.
h	Hora.
In	Insolação Diária.
Isc	Corrente de Curto Circuito do Módulo Fotovoltaico.
kWp	Kilowatt pico.
MWp	Megawatt pico.
Nbp	Número de Baterias em paralelo.
Npp	Número de Módulos em Paralelo.
Nps	Número de módulos em Série.
P	Potência da Carga Instalada.
Pd	Profundidade de descarga das Baterias.
q	Quantidade.
SP	Sol Pleno.
SPm	Sol Pleno Calculado Através da Radiação e da Insolação.
T	Tempo de Uso da Carga Instalada.
V	Volts.
Vm	Tensão Nominal do Módulo.
Vb	Tensão do Banco de Baterias.
W	Watt.
Wp	Potência Máxima do Módulo Fotovoltaico.

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO** 18
1.1 Aproveitamento da Energia Solar 18
1.2 Custos 19
1.3 Vantagens 20
1.4 Situação do Brasil 20
1.5 Objetivo 22
1.6 Escopo 25
2 **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS** 26
2.1 Radiação Solar 26
2.2 Efeito Fotovoltaico 31
2.3 Célula Fotovoltaica 32
2.4 Módulos Fotovoltaicos 33
2.5 Baterias 39
2.6 Controladores de Carga 43
2.7 MPPT 45
2.8 Inversores 45
2.9 Conversores CC-CC 47
2.10 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos 48
3 **DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS** 50
3.1 Recurso Solar 50
3.2 Carga Instalada 52
3.3 Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos 52
3.4 Dimensionamento das Baterias 54
3.5 Dimensionamento dos Controladores de Carga 55
3.6 Dimensionamento dos Inversores 56
3.7 Escolhas 57
3.8 Condutores e Proteções 58
4 **O SOFTWARE** 59
4.1 Ferramenta Utilizada 59
4.2 Configurações Básicas 61
4.3 Potencial Energético e Localização 63

4.4 Carga da Instalação 69
4.5 Módulos Fotovoltaicos 77
4.6 Baterias 79
4.7 Inversores 83
4.8 Controladores de Carga 88
4.9 Relatório Final 93
4.10 Bloqueios de Dados Incoerentes 101
5 **VALIDAÇÃO** 103
5.1 Escolha da Configuração Básica 103
5.2 Recurso Solar 103
5.3 Escolha da Carga Instalada 103
5.4 Escolha do Módulo Fotovoltaico 104
5.5 Escolha da Bateria 104
5.6 Escolha do Inversor 105
5.7 Escolha do Controlador de Carga 105
5.8 Resultados 105
6 **CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES** 109
REFERÊNCIAS 105

1 INTRODUÇÃO

O Sol é o responsável pela manutenção da vida na terra sendo uma inesgotável fonte de energia, ele fornece anualmente a terra $1,5x10^{18}$ kWh de energia solar que equivale 10000 vezes o consumo mundial de energia elétrica por ano [1]. Esta energia de sobra pode ser aproveitada para contribuir com a matriz energética mundial, que atualmente gera uma série de impactos ambientais para se firmar, como a queima de carvão que polui o meio ambiente, além de contribuir com o aquecimento global visto que a capacidade da natureza de absorver as emissões dos combustíveis fósseis é limitada. Nos últimos anos, devido principalmente a estes problemas ambientais, o mercado de energias renováveis tem crescido absurdamente. As fontes de energia renováveis são aquelas consideradas inesgotáveis para os padrões humanos de utilização, alguns exemplos são as energias solar, hidrelétrica, eólica, oceânica, geotérmica e biomassa. As atuais formas de produção de energia elétrica do mundo têm como base a queima de combustíveis fósseis como o petróleo, gás e carvão, que embora possuam reservas enormes, esses recursos diminuem com o uso, sendo uma fonte de energia não renovável. È certo que em um futuro relativamente próximo, a humanidade não poderá contar com os recursos destas fontes não renováveis, que além de serem limitadas, são causadoras de diversos danos ambientais, e como o ser humano depende de energia elétrica para quase tudo, esse conforto tem um alto custo para o planeta.

1.1 Aproveitamento da Energia Solar

A energia solar pode ser aproveitada para aquecimento utilizando a conversão térmica, nesse caso, ela aquece a água que pode ser utilizada para o banho gerando economia de energia ou para outros processos. Também pode ser aproveitada para gerar eletricidade utilizando aquecimento de água em coletores

térmicos, gerando vapor que movimenta uma turbina. Além disto, pode-se utilizar a geração de energia elétrica fotovoltaica como uma ótima forma de aproveitamento da energia solar devido a alta confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos, a possibilidade de geração em localidades distantes de centros urbanos, fácil instalação, manutenção e renovabilidade [2]. Diferente dos sistemas solares térmicos, o fotovoltaico tem a capacidade de transformar a luz captada pelo Sol em corrente elétrica, sendo uma das fontes de energia que mais cresce no mundo. A Figura 1 apresenta um diagrama onde se resume as formas de se aproveitar a energia solar.

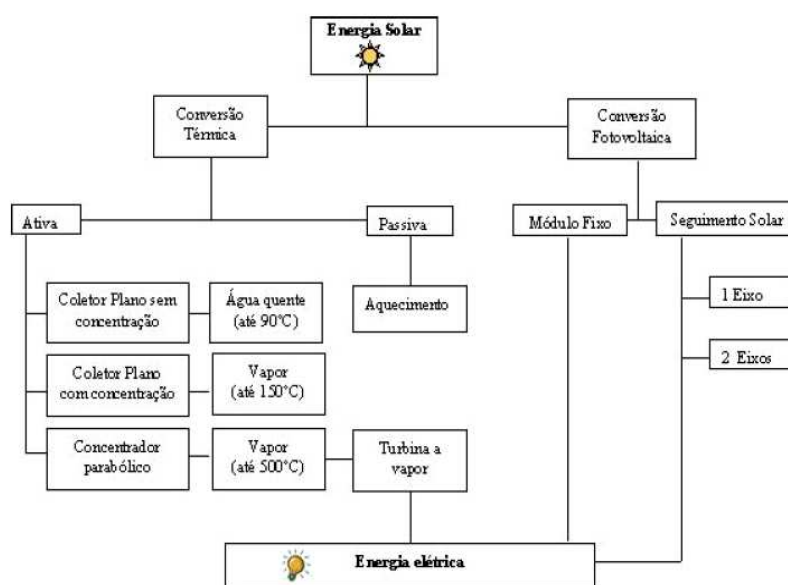



Figura 1 - Aproveitamento da Energia Solar

(Fonte: “Energia solar – princípios e aplicações” - Cepel)

1.2 Custos

Os sistemas fotovoltaicos são uma saída promissora para as questões ambientais que envolvem o desenvolvimento econômico, porém não são largamente utilizados devido ao seu alto custo em comparação com as atuais fontes de energia. É preciso uma colaboração de todos para que a pressão da sociedade sobre os impactos gerados pelas atuais formas de produção de energia aumente cada vez mais,

fazendo com que os investimentos na geração fotovoltaicos cresçam, isto fará com que as empresas que produzem equipamentos fotovoltaicos se tornem cada vez mais competitivas, aumentando a eficiência dos sistemas, aumentando a capacidade de produção destas fábricas fazendo com que os custos diminuam.

1.3 Vantagens

Uma das principais características dos sistemas fotovoltaicos é poder gerar energia em localidades distantes dos centros urbanos que possuem inúmeras redes de distribuição de energia, não sendo necessárias estas redes, já que a eletricidade é consumida no local em que é produzida. Além disto, o Brasil possui um enorme potencial energético de radiação solar, o que faz dos sistemas fotovoltaicos uma oportunidade promissora de produção de energia renovável. Os sistemas fotovoltaicos podem ser interligados a rede elétrica convencional para contribuir com a geração já implementada.

A energia elétrica é de fundamental importância para o desenvolvimento da sociedade, principalmente as comunidades mais isoladas que tem problemas de alimentação, saúde, comunicação, educação, assim, juntamente com outras iniciativas, facilitar o fornecimento de energia elétrica pode trazer soluções eficientes.

Os módulos fotovoltaicos podem ser utilizados em qualquer lugar que possua uma boa quantidade de radiação solar incidente, podendo ser usadas em telhados, fachadas de residências e edifícios para suprir as necessidades locais de energia elétrica.

1.4 Situação do Brasil

O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, pois quase toda eletricidade é gerada por usinas hidrelétricas. A energia fotovoltaica vem de

uma forma para complementar a produção nacional através de um enorme potencial de produção de energia elétrica utilizando sistemas fotovoltaicos. Essa produção deve ocorrer principalmente em grandes áreas, como telhados de grandes construções, e em comunidades isoladas em que a transmissão se torna inviável [1]. As fontes de energia intermitentes complementam bem outras fontes que possuem maior regularidade, como as hidrelétricas, que dependem da quantidade de água nos reservatórios, assim, ao suprir o sistema elétrico com outras fontes, há a possibilidade de manter os reservatórios mais cheios.

Devido a base da geração de energia no Brasil ser de hidrelétricas, existe uma pequena representatividade da produção de energia elétrica fotovoltaica do Brasil, apesar disto, os centros de pesquisa brasileiros estão trabalhando intensivamente e desenvolvendo uma sólida capacidade intelectual nesta área. Entre estes se destaca o “Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito”, o **Cresesb**. Além do Cresesb, existem outros como o **Green Silicon** do Instituto de Tecnologia do Paraná (Tecpar) e o **Green Solar** na PUC-MG.

Desafios técnicos, econômicos e políticos, precisam ser vencidos para que as fontes de energia solar fotovoltaica cresçam no Brasil. O governo possui programas de geração de energia fotovoltaicos autônomos voltados para a eletrificação rural como o Luz Para Todos, que visa levar energia a toda a população dando ênfase as comunidades isoladas, como ocorre principalmente na região da Amazônia e de outros que incentivam a eficiência energética como o **Prodeem**, **Produzir**, **Apaeb** e o **Solar Brasil**. Muitas residências brasileiras passaram a ser atendidas por sistemas fotovoltaicos autônomos através do programa Luz Para Todos.

Em 2012, a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, aprovou uma Resolução Normativa, criando uma Regulamentação para que qualquer consumidor de energia possa gerar energia para a concessionária local se tornando um Micro ou Mini Gerador tendo o armazenamento de créditos energéticos. Para Micro Geração os geradores terão potência de até 100 kWp, para Mini Geração serão os sistemas com potência superior a 100 kWp, mas inferior a 1 MWp, e acima de 1 MWp já se classifica como usina. Os geradores podem ser fotovoltaicos, eólicos e hidráulicos, sendo que devido ao enorme potencial de radiação solar do Brasil, a tecnologia mais aplicada é a energia fotovoltaica. Para um país que caminha para a eficiência e

modernização energética como o Brasil, esta é uma ótima conquista que reduzirá os impactos ambientais gerados por outros métodos de produção de energia elétrica em larga escala [3]. O número de sistemas fotovoltaicos conectados a rede no Brasil vem aumentando e sua utilização deverá ser um salto nos próximos anos.

A criação do projeto “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”, lançado pela ANEEL em 2011, foi uma estratégia importante para a inserção da energia fotovoltaica no País. O projeto promove a criação de usinas experimentais de energia fotovoltaica interligada ao sistema elétrico.

O Brasil é privilegiado com elevadas taxas de irradiação solar em todo o seu território, portanto, é razoável esperar para o Brasil que se torne um dos líderes mundiais no emprego da energia solar fotovoltaica, que é uma opção viável e promissora, apesar de ainda ser praticamente desprezível no Brasil.

1.5 Objetivo

Com todas as perspectivas que envolvem a geração fotovoltaica, é fundamental o desenvolvimento de uma ferramenta de dimensionamento destes sistemas de modo a construir um sistema com melhor adequação e com baixo custo. O objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um *software* para dimensionar sistemas fotovoltaicos isolados e interligados a rede elétrica, que recebeu o nome de FOTOGERA. Para contribuir ainda mais com o perfeito funcionamento do *software* é possível atualizar constantemente os dados de novos equipamentos disponíveis no mercado, sempre adequando o resultado as necessidades requisitadas, visto que o custo de instalação destes sistemas ainda é bem elevado.

O principio do dimensionamento fotovoltaico está em calcular a quantidade de módulos solares, baterias e suas características, além de outros elementos, que podem ser acrescentados. Os módulos são responsáveis por converter a energia irradiada pelo sol. Para isso deve-se conhecer plenamente a carga elétrica que será

alimentada pelo sistema. Para sistemas interligados a rede de distribuição de energia, não há necessidade de armazenamento de energia, sem uso de baterias.

O *software* proporciona ao usuário a possibilidade de dimensionar sistemas fotovoltaicos autônomos, com ou sem armazenamento de energia e sistemas interligados a rede elétrica convencional, que são muito promissores devido a possibilidade de gerar energia e “vender” para as concessionárias de energia elétrica, gerando lucro através de créditos energéticos que reduzem o valor da conta de energia. É possível selecionar os valores de radiação para cada mês do ano em qualquer localidade do Brasil, proporcionando maior desempenho ao sistema visto que a radiação solar apresenta variabilidade. Para os sistemas conectados a rede elétrica, o *software* possibilita ao usuário a calcular a quantidade de energia que se pode gerar com determinados equipamentos fotovoltaicos ou dimensionar um sistema que gere um valor especifico de energia durante o mês, além de permitir que o usuário calcule em quanto tempo o investimento em um sistema fotovoltaico pode ser compensado. O *software* apresenta dicas de instalação dos sistemas para o usuário como o esquema de ligação e inclinação dos módulos e possui bloqueio contra dados incoerentes, guiando o usuário passo a passo para que o dimensionamento se torne mais simples sendo realizado em etapas.

O *software* tem o objetivo de ser aproveitado por usuários com conhecimento técnico moderado sobre sistemas fotovoltaicos para ser utilizado como método de dimensionamento de sistemas com foco em uma montagem prática, principalmente em sistemas conectados a rede elétrica que tendem a ser muito mais utilizados que os sistemas autônomos. Ele é indicado a ser utilizado por uma grande quantidade de profissionais como fabricantes, instaladores de sistemas, entidades ligadas ao ensino, sensibilização ambiental, dentre outros.

No mercado existem diversos modelos de *softwares* que dimensionam sistemas fotovoltaicos, alguns possuem dados desnecessários a aplicação prática de montagem de sistemas e custo elevado, o que pode dificultar seu acesso a algumas pessoas, o *software* FOTOGERA foi criado com o intuito de ser uma ferramenta de fácil utilização, sem custo e voltada para a montagem de sistemas fotovoltaicos de uma forma pratica.

Tem-se por exemplos alguns softwares como o **SolTerm**, desenvolvido pelo LNGE (Laboratório Nacional de Geologia e Energia) em Portugal, que custa 160 Euros cada licença, além de dimensionar sistemas fotovoltaicos, ele também tem a capacidade de simular o funcionamento do sistema, analisando o seu desempenho. Ele não possui banco de dados de equipamentos. O **SolSim**, desenvolvido pela *EnerWorks* Inc na Alemanha, que custa US$ 730,00, possui a capacidade de dimensionar e simular sistemas fotovoltaicos, focado em sistema híbridos permitindo combinação com geradores eólicos dentre outros, ele não possui banco de dados de radiação nem de equipamentos, ele é disponível somente em alemão. O **PVS** desenvolvido pela *Fraunhofer Institute of Solar Energy System*, que custa US$ 438,00, permite o dimensionamento e simulação de sistemas autônomos e conectados, não possui banco de dados de radiação nem de equipamentos, possui rotina para otimizar a inclinação dos módulos. Disponível em inglês e em alemão. O **SIDIM**, desenvolvido na Alemanha pela *Solaris-Energie-Consulting,* que custa US$ 197,00, ele dimensiona e simula sistemas autônomos e conectados a rede e possui banco de dados de equipamentos e também possui o preço dos equipamentos, ele é disponível somente em alemão. O **SolEm**, desenvolvido na Alemanha no *Microsoft Excel,* que custa US$62,00. Permite a simulação dos sistemas e possui banco de dados de radiação para países Europeus. Disponível somente em alemão. Os preços menores são de *softwares* que não possuem uma interface boa com o usuário, como alguns montados em Excel e que exigem um maior conhecimento por parte do usuário para sua utilização [4].

Ao comparar os recursos do FOTOGERA com outros softwares do mercado, é possível observar que no geral ele possui as mesmas funcionalidades superando diversas características em alguns casos. A maioria dos *softwares* do mercado possui a capacidade de simulação dos sistemas fotovoltaicos, mas a maioria não possui banco de dados de radiação que é um dos principais causadores da variabilidade da geração fotovoltaica, com um bom banco de dados de radiação, a característica de simulação pode ser dispensada que é o caso do FOTOGERA por utilizar os mapas solares do CEPEL. Poucos *softwares* possuem banco de dados de equipamentos disponíveis no mercado, o FOTOGERA possui banco de dados de diversos equipamentos facilitando a escolha para o usuário, que pode selecionar um equipamento compatível e disponível no mercado. A maioria dos *softwares*

disponíveis no mercado estão em língua estrangeira, o que pode dificultar a sua utilização no Brasil além de que os que possuem banco de dados, estes dados normalmente são da Europa ou dos EUA. Além de superar alguns *softwares* em determinadas características, a comparação do custo do FOTOGERA o torna ainda mais vantajoso.

1.6 Escopo

Além da introdução são apresentados mais cinco capítulos que fundamentam este trabalho. O capítulo 2 apresenta o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, suas principais características, componentes e nomenclaturas, no capítulo 3 é apresentado com é feito o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos ou interligados a rede elétrica, o capítulo 4 descreve o funcionamento do *software* FOTOGERA, este capitulo pode ser utilizado como manual de instruções, o capítulo 5 apresenta a validação do software, sendo montado um sistema físico e testado, o capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho desenvolvido.

2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos convertem a energia proveniente da radiação solar em energia elétrica. Esta energia gerada é condicionada e utilizadas em sistemas autônomos ou é injetada diretamente na rede elétrica de potência. Aqui é apresentado o funcionamento de um sistema fotovoltaico desde a radiação solar até o destino da energia elétrica gerada e os principais equipamentos utilizados nesse processo.

2.1 Radiação Solar

O Sol fornece para nosso planeta $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia anualmente, isto confirma que o Sol é uma fonte inesgotável de energia havendo um enorme potencial de sua utilização através de sistemas de conversão de energia. Uma das possíveis formas de conversão da energia solar é a utilização do efeito fotovoltaico que converte a radiação solar em energia elétrica.

A radiação solar que atinge a atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar que é uma camada de 300 km de espessura e temperatura superficial de 5800 K, não mantendo uma radiação com regularidade, sendo o valor médio de 1367 W/m^2 de radiação incidente. A radiação solar se propaga a 300000 km/s e possui comprimento de onda da ordem de 0,1 μm a 5 μm. A Figura 2 ilustra a distribuição espectral da radiação solar [1].

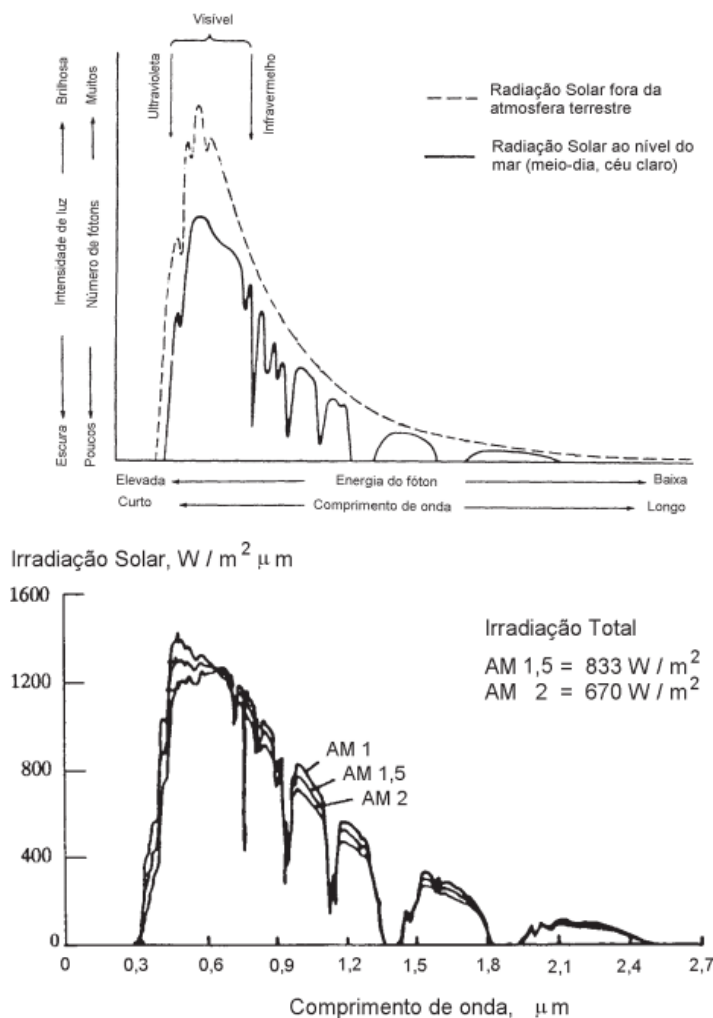



Figura 2 - Distribuição Espectral da Radiação Solar.
(Fonte: “photovoltaic system Technology _ An European handbook”)

Anualmente, a Terra descreve ao redor do Sol, através de uma trajetória elíptica, um plano inclinado de 23,5º em relação a linha do equador. Este ângulo é chamado de Declinação Solar (δ) e fica compreendido entre os limites -23,45° ≤ δ ≤ 23,45°, apresentado na Figura 3.

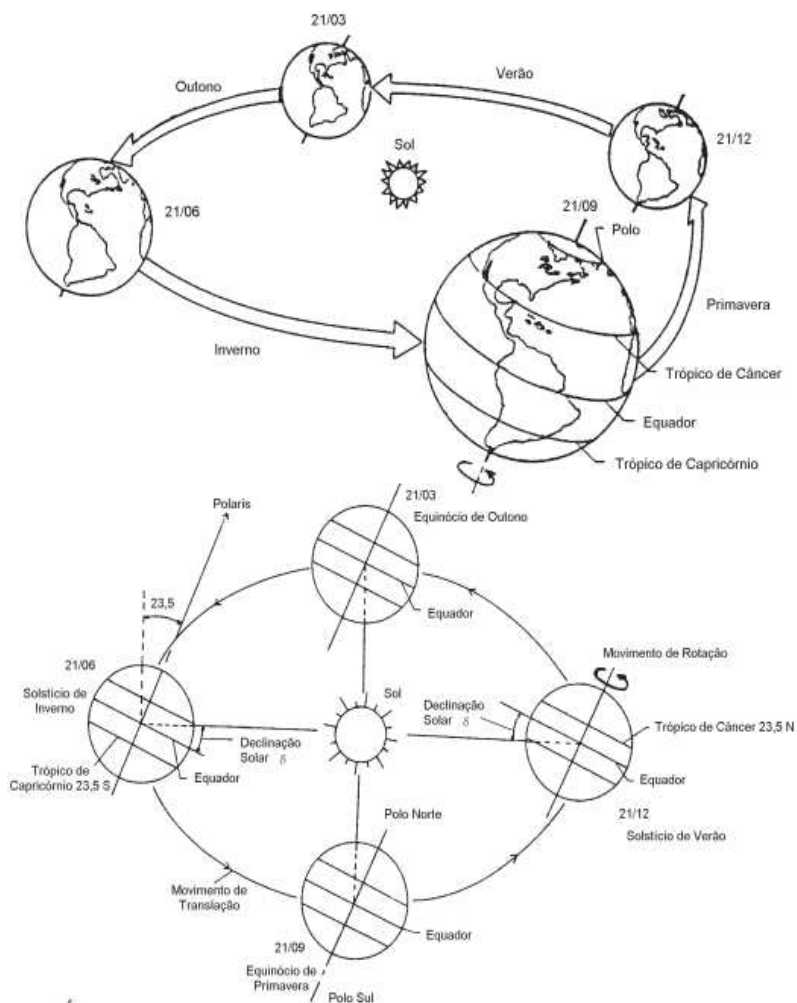



Figura 3 - Movimento da Terra em Torno do Sol.

(Fonte: CRESESB/CEPEL; “Sistemas Fotovoltaicos: Manual de Engenharia”)

Além destes, existem outros ângulos que são importantes para as relações entre os raios solares e a superfície da terra, que variam conforme a localidade e inclinação do planeta.

- Ângulo de incidência (γ): ângulo entre os raios solares e à superfície de incidência.

- Ângulo Azimutal da Superfície (aw): ângulo entre a superfície de incidência (normal) e a direção Norte-Sul. -180° ≤ aw ≤ 180°.

- Ângulo Azimutal do Sol (as): ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção Norte-Sul.

- Altura Solar (α): ângulo entre o raio solar e a sua projeção sobre um plano horizontal.

- Inclinação (β): ângulo entre o plano da superfície e a horizontal.

- Ângulo Zenital (θz): ângulo entre os raios solares e a vertical (Zênite).

Alguns destes ângulos são apresentados na Figura 4.

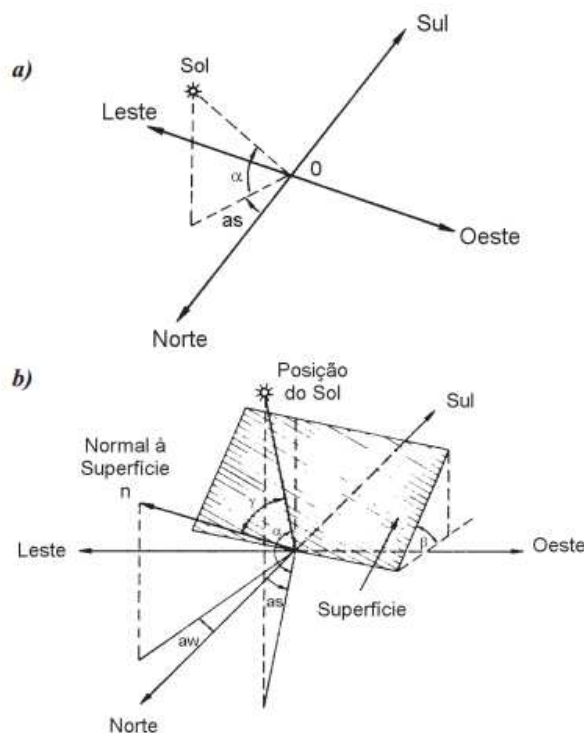



Figura 4 - Ângulos dos Raios Solares.

(Fonte: CRESESB/CEPEL; “Sistemas Fotovoltaicos: Manual de Engenharia”)

Devido a reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera, somente uma parte da radiação solar chega a superfície terrestre. Caso a superfície receptora estiver inclinada em relação aos raios solares como acontece em regiões próximas aos pólos ocorre a reflexão do ambiente do entorno, como vegetações e montanhas, esta reflexão é chamada de “albedo”. Além disto, por causa da alternância entre dias e noites, dias chuvosos e estações do ano, o recurso energético solar pode apresentar variabilidade necessitando de um sistema de armazenamento adequado.

Na maior parte do Brasil, como em todo hemisfério sul, os sistemas de captação solar fixos devem ser orientados para o norte geográfico para aproveitar melhor a incidência dos raios solares, aumentando a eficiência do sistema. Este ângulo deve ser próximo a valor da latitude do local, como ilustra a Figura 5. Para projetos de

sistemas de captação com rastreio do sol é necessário a utilização de *softwares* mais sofisticados que utilizam cálculos de astronomia de posição e dados solarimétricos.

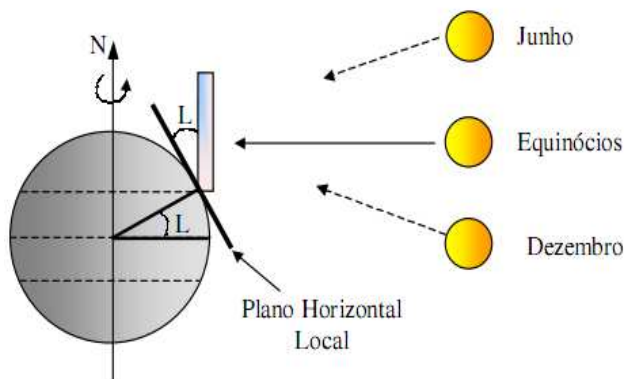



Figura 5 - Módulo Fotovoltaico com Inclinação Igual ao Ângulo de Latitude.

(Fonte: *Masters* - 2004)

Para os sistemas fixos, mapas de radiação solar, como apresenta a Figura 6, são construídos com base em medições passadas e são suficientes para um bom dimensionamento destes sistemas. Os instrumentos mais utilizados nas medições de grandezas solares são os Heliógrafos, que medem o número de horas de insolação diária, Actinógrafos e Piranômetros, que medem a radiação global [5].

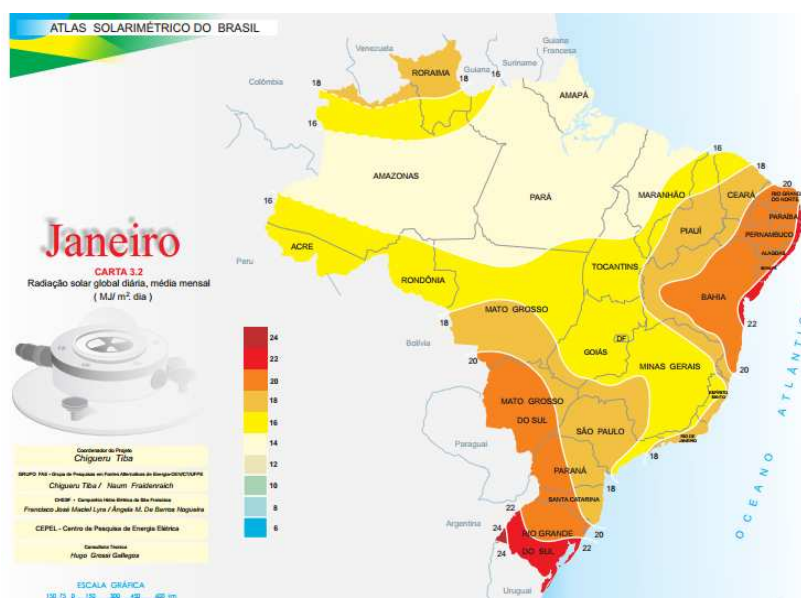



Figura 6 - Mapa de Radiação Solar Média do Brasil.

(Fonte: “Atlas Solarimétrico do Brasil 2000” Cepel.Cresesb)

2.2 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é responsável pela conversão de energia solar em elétrica com a utilização de materiais semicondutores como o silício. Os átomos de silício possuem quatro elétrons na camada de valência, como descreve a Figura 7, que se liga a outros átomos. Ao adicionarem-se átomos de cinco elétrons na camada de valência, como o fósforo, sobra-se um elétron, sendo denominado de dopante do tipo n. Caso seja realizado ao contrario, ao adicionar átomos, como o boro, que possuem três elétrons na camada de valência, falta-se um elétron, chamado de lacuna, sendo denominado de dopante do tipo p [6].

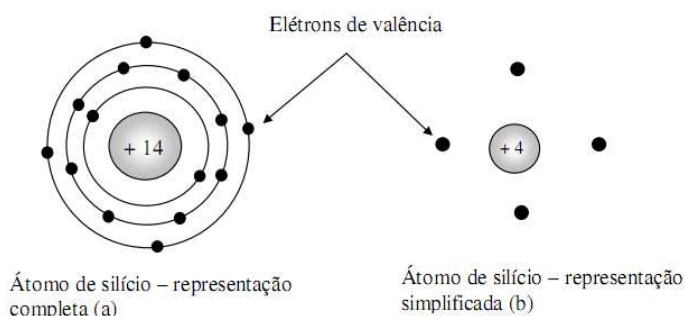



Figura 7 - Átomo de Silício.

(Fonte: João et al – 1996)

A Figura 8 descreve o efeito do átomo de fósforo com um elétron sobrando e o do átomo de boro com uma lacuna sobrando.

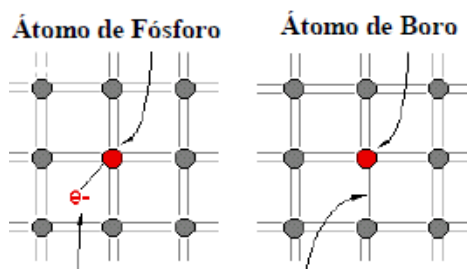



Figura 8 - Átomo de Fósforo e Átomo de Boro.

Ao unir estes materiais tipo P e tipo N, forma-se uma junção PN, assim quando os fótons provenientes do Sol atingem a junção, os elétrons liberados tendem a ocupar uma lacuna formando uma corrente elétrica como apresenta a Figura 9.

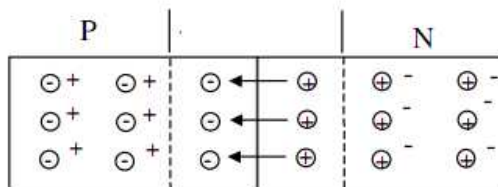



Figura 9 - Junção PN.

2.3 Célula Fotovoltaica

Uma célula fotovoltaica é construída através de um cristal de silício puro onde em uma metade se coloca dopante do tipo p e na outra dopante do tipo n, assim os elétrons livres no lado n se deslocam para as lacunas do lado p, com isso a região n fica com deficiência de elétrons e a região p com excesso de elétrons. Esta configuração gera um campo elétrico no material gerando uma força que se opõe a difusão de elétrons, quando essa junção é bombardeada por fótons provenientes da luz solar gerando certa quantidade de energia na região onde existe campo elétrico e as cargas são aceleradas produzindo uma corrente elétrica. Este deslocamento gera uma diferença de potencial na junção como apresenta Figura 10 [6].

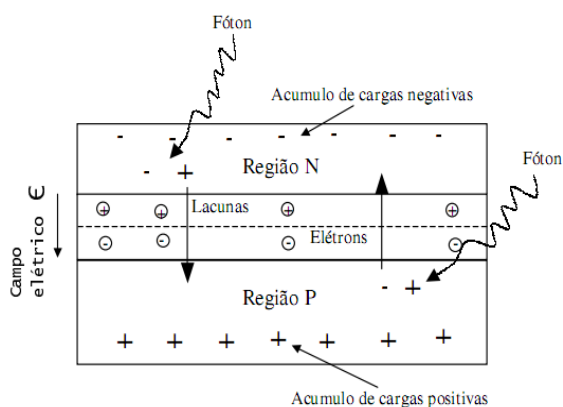



Figura 10 - Célula Fotovoltaica Genérica.

(Fonte: MASTERS - 2004)

Entre os terminais da região P e da região N, ao conectar uma carga como ilustra a Figura 11, os elétrons irão “fugir” para fora da região N retornando para a região P.

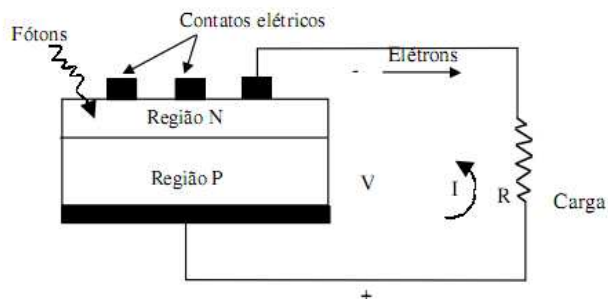



Figura 11 - Circuito equivalente da célula.

(Fonte: *MASTERS* – 2004)

2.4 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são formados pela associação de células fotovoltaicas em série e em paralelo. Na Figura 12 pode-se ver como é feita a associação em série.

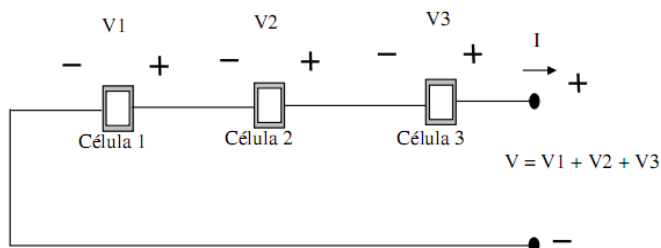



Figura 12 - Associação de Células em Série.

(Fonte: Marco Antonio d Azevedo Menezes - 2008)

A Figura 13 ilustra o gráfico da corrente versus tensão para esta associação. A tensão aumenta e a capacidade de corrente permanece inalterada.

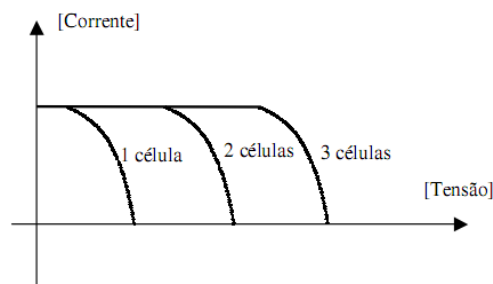



Figura 13 - Associação de Células em Série – Corrente x Tensão.

(Fonte: Marco Antonio d Azevedo Menezes - 2008)

A Figura 14 ilustra como é feita a associação de células fotovoltaicas em paralelo.

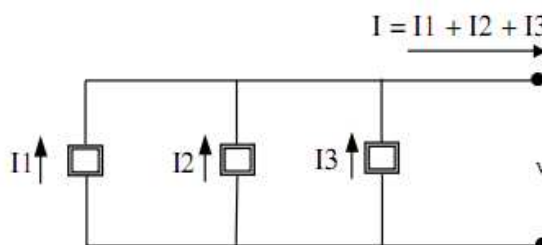



Figura 14 - Associação de Células em Paralelo.

(Fonte: Marco Antonio d Azevedo Menezes - 2008)

A Figura 15 ilustra o gráfico da corrente versus tensão para esta associação. A capacidade de corrente aumenta e a tensão permanece inalterada.

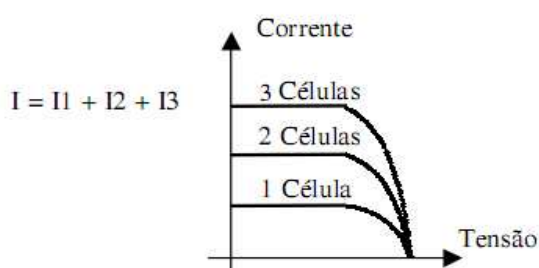



Figura 15 - Associação de Células em Paralelo – Corrente x Tensão.

(Fonte: Marco Antonio d Azevedo Menezes - 2008)

Assim pode-se fazer varias associações em série e em paralelo com as células fotovoltaicas e construir módulos fotovoltaicos de acordo com a tensão a ser gerada e a capacidade de corrente fornecida, como descreve a Figura 16.

Figura 16 - Associação de Módulos Fotovoltaicos.

(Fonte:“http://eficienciaenergtica.blogspot.com.br/2010_06_01_archive.html“)

O objetivo do sistema fotovoltaico é a transformação da energia captada através do Sol em energia elétrica, os conjuntos de módulos fotovoltaicos são responsáveis pela transformação da radiação solar em energia elétrica, os módulos podem ser associados em série e paralelo para obter valores de tensão e corrente mais expressivos, formando os sistemas fotovoltaicos [7].

Células defeituosas podem limitar a saída de potência do módulo, por isso deve ser instalado um diodo de *bypass* para servir como caminho alternativo para a corrente elétrica e limitar a dissipação de calor na célula defeituosa [2]. O esquema de ligação do diodo de *bypass* é apresentado na Figura 17.

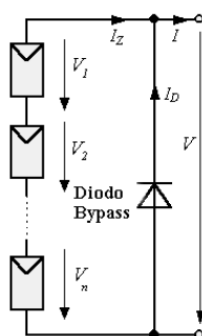



Figura 17 - Diodo de *Bypass*.

(Fonte: “Energia solar – princípios e aplicações” Cepel)

Outro problema comum é quando os módulos estão interligados a baterias e durante a noite passam a serem consumidores ao invés de fontes geradoras. Deve ser introduzido o diodo de bloqueio impedindo a ocorrência de correntes reversas [2]. O esquema de ligação do diodo de bloqueio é apresentado na Figura 18.

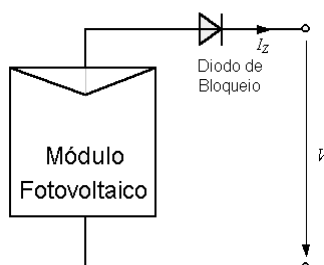



Figura 18 - Diodo de Bloqueio.

(Fonte: “Energia solar – princípios e aplicações” Cepel)

Os principais parâmetros dos módulos fotovoltaicos necessários para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos são [1]:

- Tensão de circuito aberto (Voc).

- Corrente de curto circuito (Isc).

- Potência máxima (Pm).

- Tensão de potência máxima (Vmp).

- Corrente de potência máxima (Imp).

A tensão de circuito aberto Voc é medida quando o modulo é exposto ao Sol em seus terminais sem carga. A corrente de curto circuito é medida ao colocar seus terminais em curto. Ao conectar na saída do modulo uma carga, é possível construir uma curva característica de tensão e corrente, chamada de curva característica IxV. Essa curva é construída com uma incidência de radiação solar de 1000 W/m^2 e a uma temperatura de 25ºC. A curva característica IxV é normatizada pela norma ABNT (NBR10899/-TB328). Um exemplo de curva característica IxV é apresentada na Figura 19 [1].

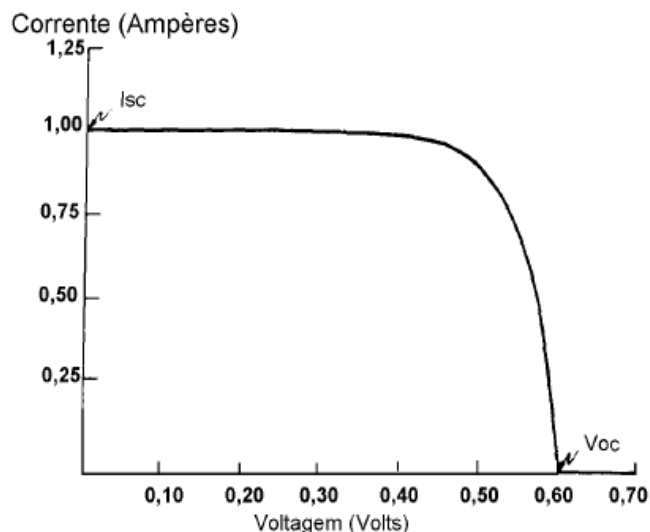



Figura 19 - Curva I x V de um Módulo Fotovoltaico.

(Fonte: *Florida Solar Energy "Photovoltaic System Design – Course Manual"*)

Também é possível construir a curva típica de potência versus tensão que é apresentado na Figura 20.

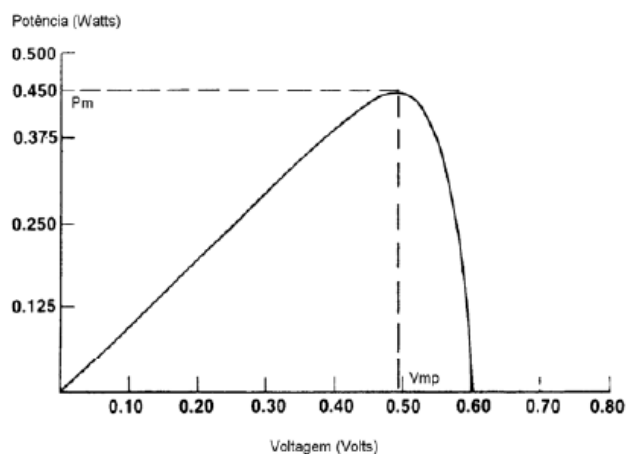



Figura 20 - Curva P x V de um Módulo Fotovoltaico.

(Fonte: *Florida Solar Energy "Photovoltaic System Design – Course Manual"*)

Reunindo as duas curvas pode-se obter o ponto de máxima potencia do módulo fotovoltaico que é apresentado na Figura 21.

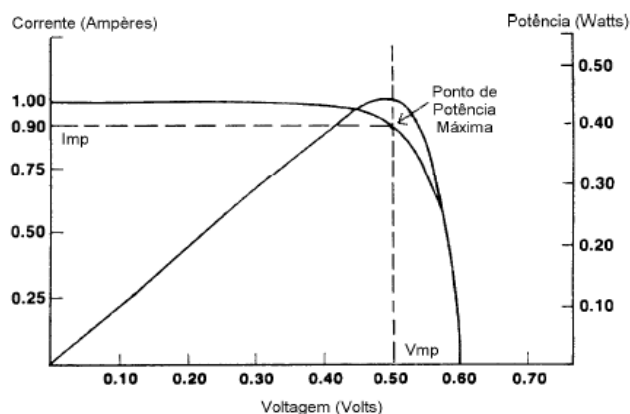



Figura 21 - Ponto de Máxima Potência de um Módulo Fotovoltaico.

(Fonte: *Florida Solar Energy “Photovoltaic System Design – Course Manual”*)

Um módulo fotovoltaico sofre influência principalmente da luminosidade incidente e da temperatura das células. A corrente gerada no módulo cresce proporcionalmente com o aumento da intensidade luminosa, como ilustra a Figura 22, e o aumento da temperatura diminui a potência gerada, conforme apresentado na Figura 23 [7].

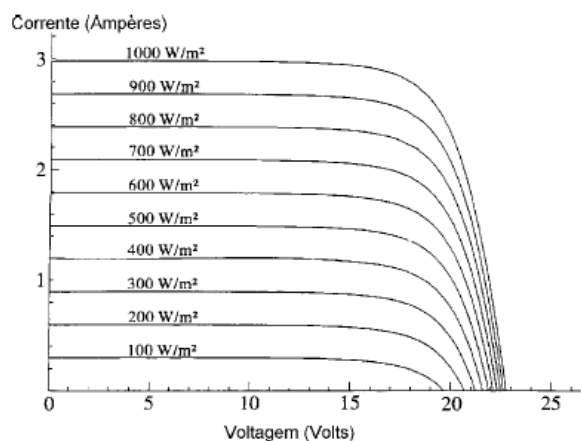



Figura 22 - Curva Caracterizada Pela Variação da Intensidade Luminosa.

(Fonte: *Florida Solar Energy, “Photovoltaic System Design – Course Manual”*)

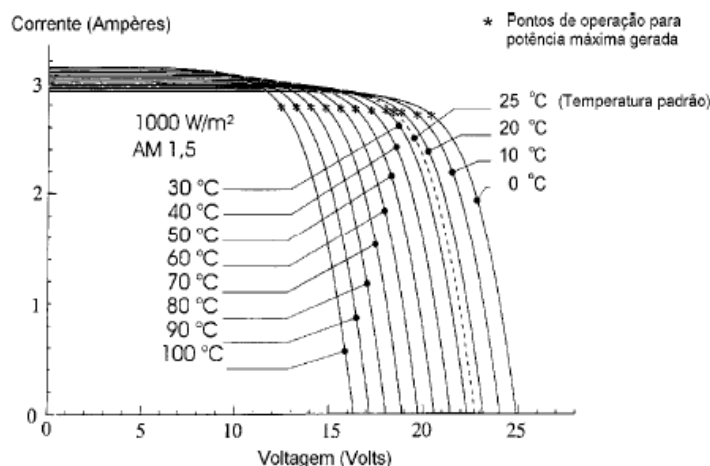



Figura 23 - Curva Caracterizada Pela Variação da Temperatura.

(Fonte: *Florida Solar Energy, "Photovoltaic System Design – Course Manual"*)

2.5 Baterias

Os módulos fotovoltaicos geram energia elétrica durante grande parte do dia e podem-se armazenar esta energia em baterias, para poder utilizá-la em outros períodos, como durante a noite e dias nublados.

As baterias podem ser utilizadas e recarregadas varias vezes durantes longos períodos obedecendo ao ciclo diário de carga e descarga de um sistema fotovoltaico, além de ter que suportar descargas profundas em algumas situações como vários dias sem radiação solar.

Devido a disponibilidade no mercado e ao baixo custo, as baterias mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos são as de chumbo-ácido. Uma bateria é formada por um conjunto de células eletroquímicas, que é constituída de dois eletrodos imersa em uma solução eletrolítica que transformam energia química em elétrica e vice-versa [1].

O pólo positivo (ânodo) é formado de dióxido de chumbo e o pólo negativo (cátodo) de chumbo poroso, imersos numa solução de ácido sulfúrico 37%. A Figura 24 ilustra a reação que envolve o processo de carga e descarga deste tipo de bateria [8] e a Figura 25 ilustra o aspecto construtivo de uma bateria chumbo-ácido.

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \underset{carga}{\overset{descarga}{\rightleftarrows}} 2\,PbSO_4 + 2H_2O$$

Figura 24 - Reação Química na Bateria de Chumbo-Ácido.

(Fonte: “Energia solar – princípios e aplicações” - Cepel)

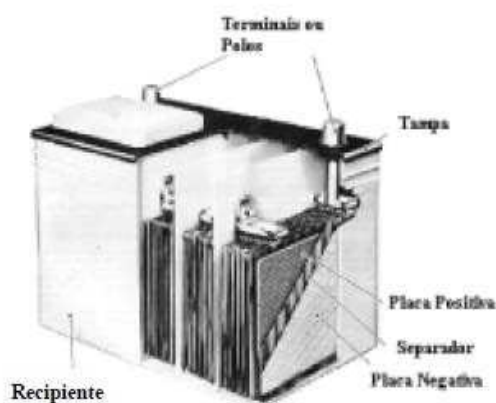



Figura 25 - Aspecto Construtivo de uma Bateria Chumbo-Ácido.

(Fonte: “Energia solar – Princípios e aplicações” - Cepel)

Alguns termos são necessários conhecer na operação de baterias:

Auto descarga: processo em que a bateria descarrega gradualmente quando não está em operação, um exemplo é apresentado na Figura 26, deve-se evitar que as baterias fiquem em repouso por muito tempo [8].

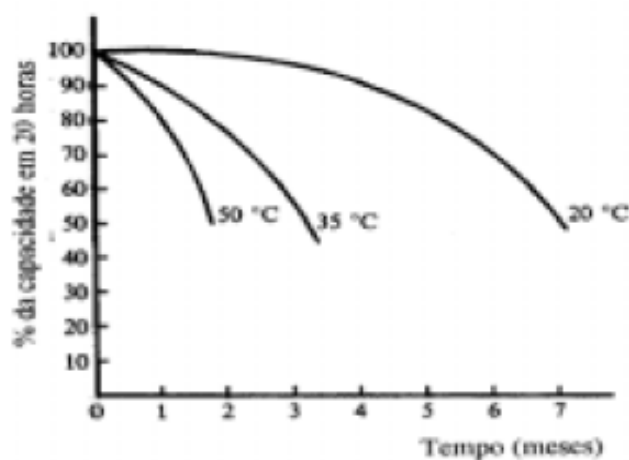



Figura 26 - Auto Descarga de Baterias Chumbo-Ácido com o Tempo.

(Fonte: “Luis Horacio Vera – 2004”)

Capacidade: quantidade de energia que a bateria poderá fornecer em uma descarga completa. Essa capacidade varia de acordo com a velocidade de carga e descarga, sendo que quanto menor a velocidade de descarga, maior será a sua capacidade, que também varia com a temperatura. A capacidade nominal é o valor em (Ah) fornecido pelo fabricante. A Figura 27 ilustra a variação da capacidade da bateria com a corrente de descarga e a Figura 28 apresenta a variação da capacidade com a temperatura [8].

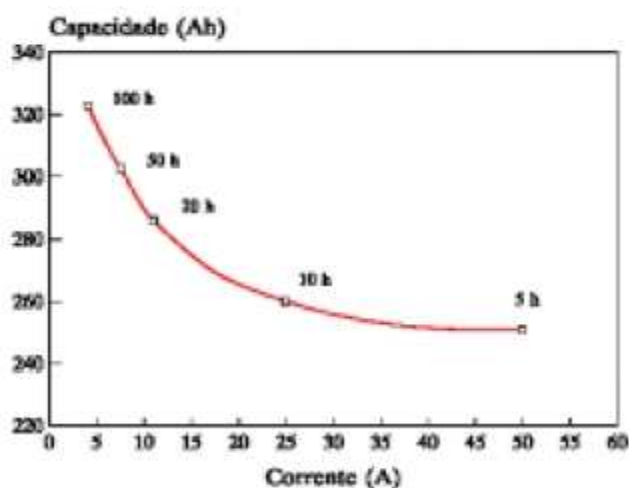



Figura 27 - Variação da Capacidade x Corrente de Descarga.

(Fonte: “Luis Horacio Vera – 2004”)

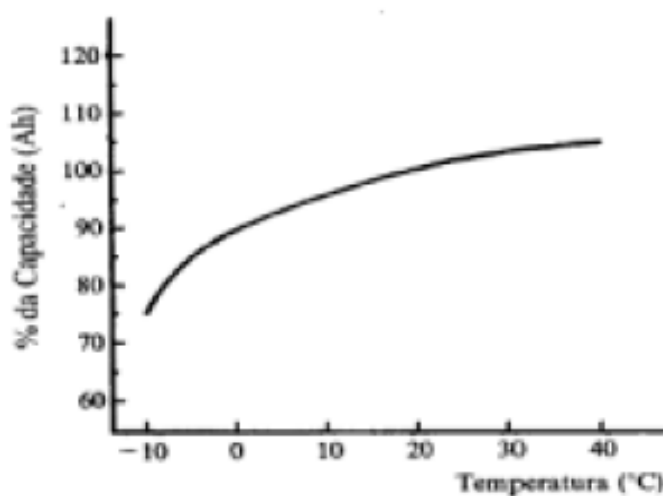



Figura 28 - Variação da Capacidade com a Temperatura.

(Fonte: “Luis Horacio Vera – 2004”)

Estado de carga (EC): capacidade disponível em um determinado instante, sendo descrito em porcentagem da capacidade nominal [8].

Taxa de carga/descarga: corrente elétrica demandada durante o processo de carga ou descarga da bateria. A Figura 29 descreve a curva de carga e descarga de uma bateria [8].

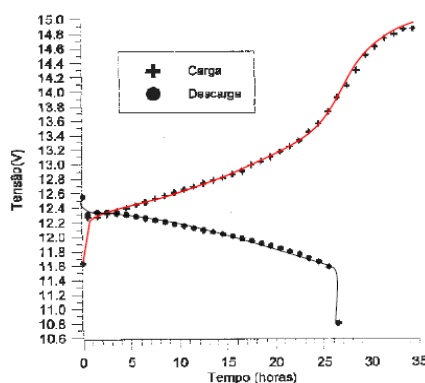



Figura 29 - Curva de Carga/Descarga para uma Bateria de 12 V a 25ºC.
(Fonte: “Luis Horacio Vera – 2004”)

Profundidade de descarga: é o valor em porcentagem da capacidade nominal que foi retirada a partir do estado de plena carga, que é quando a bateria está completamente carregada [8].

Tensão de corte: valor de tensão no qual a descarga da bateria é interrompida.

Ciclo: processo de carga e descarga até certa profundidade.

Vida útil: tempo em que a bateria opera mantendo funcionamento normal.

Eficiência: relação entre a saída útil e a entrada.

Uma bateria usada em sistemas fotovoltaicos deve atender a ciclos rasos a cada dia e ciclos profundos por vários dias (dias nublados). Como normalmente os sistemas fotovoltaicos são instalados em locais remotos, é recomendado utilizar baterias sem ou com pouca necessidade de manutenção, que não precisam repor o eletrólito, como as baterias seladas que usam o ciclo interno de oxigênio para eliminar a perda de água. Essas baterias resistem mais a uma descarga completa do que outros tipos

de baterias. Elas possuem um custo mais elevado que é compensado com sua utilidade e com a não necessidade de manutenção [1].

2.6 Controladores de Carga

Os controladores de carga têm a função de não danificar e manter a vida útil das baterias. Além disto, eles permitem uma máxima transferência de energia dos módulos fotovoltaicos para as baterias. Eles cessam o fornecimento de energia pelas baterias quando elas já estão na tensão de corte e desconectam os módulos quando as baterias estão em plena carga. Também podem monitorar os valores de tensão e corrente do sistema acionando alarmes necessários [8].

Eles devem ser projetados de acordo com o tipo de bateria a ser implementada, um controlador para bateria de chumbo-ácido selada pode não ser tão eficiente para uma bateria chumbo-cálcio não selada.

Alguns sistemas de cargas contínuas e estáveis podem ser projetados para operar sem controlador de carga, porém isto não é recomendado.

Os controladores diferem principalmente na sua grandeza utilizada para o controle, entre as mais utilizadas, estão a carga (integração da corrente), tensão e densidade do eletrólito. São classificados em *SHUNT*, como ilustra a Figura 30, ou SÈRIE, apresentado na Figura 31. Isto é, devido a forma que desconectam o sistema quando o mesmo está em plena carga, sendo o *SHUNT* o mais comumente utilizado por gastar menos energia. Ele desvia parte da energia gerada deixando apenas uma pequena parcela carregando a bateria quando esta está em plena carga. Já o tipo SÉRIE desconecta completamente o banco de baterias [8].

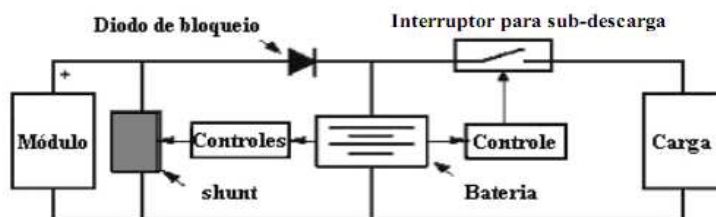



Figura 30 - Controlador Tipo *SHUNT*.

(Fonte: “Luis Horacio Vera – 2004”)

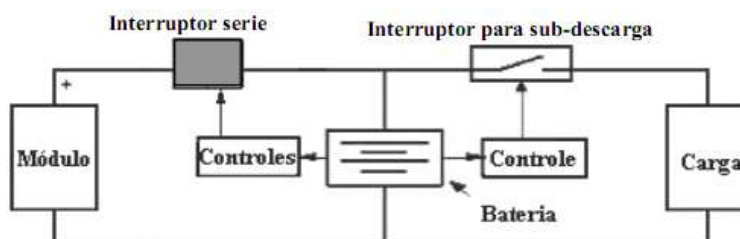



Figura 31 - Controlador Tipo SERIE.

(Fonte: “Luis Horacio Vera – 2004”)

Alguns controladores permitem o ajuste dos parâmetros. Podem vir com o recurso de alterar os *SET POINTS* do controlador, assim pode-se ajustar, por exemplo, com qual valor de tensão o sistema irá se desconectar do banco de baterias evitando um descarregamento excessivo e qual valor se reconectará novamente. O ponto de desconexão da carga é normalmente chamado de LVD (*low voltage disconnect*) [8].

Os controladores normalmente já possuem um diodo de bloqueio que impede durante a noite ou em dias nublados, que as baterias alimentem os módulos fotovoltaicos. Alguns possuem uma compensação de temperatura, tendo um sensor nas proximidades do banco de baterias e ajustando automaticamente a tensão. Por exemplo, para uma bateria chumbo-ácido de 12 V, cerca de -30m V/ºC. Outros possuem a capacidade de desviar a energia gerada, assim se as baterias estiverem carregadas, a energia gerada é aproveitada em outra carga, evitando o desperdício [8].

O controlador mais utilizado é o por controle de tensão, que é medida instantaneamente nos pólos da bateria. Porém, o parâmetro tensão não segue a risca as características da bateria, portanto é preciso ter cautela, pois se pode estar

desconectando uma bateria que ainda possui carga suficiente para continuar operando.

2.7 MPPT

A potência gerada pelo módulo fotovoltaico varia de acordo com as condições ambientais e a configuração do sistema fotovoltaico. É desejável que o módulo fotovoltaico sempre trabalhe no ponto de máxima potência. Alguns controladores possuem o algoritmo MPPT (*maximum power point tracker* – seguidor do ponto de máxima potência) que mantém o módulo constantemente no ponto de máxima potência. Eles utilizam conversores de potência e mantém o produto tensão x corrente gerada no valor maior possível, aumentando a eficiência do sistema. Os MPPT são bastante sofisticados e são indicados a sistemas de grande porte para justificar o seu custo [9]. A Figura 32 descreve a sua localização em um sistema fotovoltaico para cargas AC.

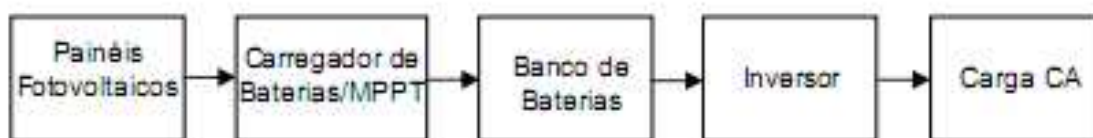



Figura 32 – Localização do MPPT.

(Fonte: Julio Igor Lopes Seguel - 2009)

2.8 Inversores

A maioria das cargas elétricas são de corrente alternada (CA), como televisão e geladeira de residências, por isto, precisa-se converter a energia de corrente contínua (CC) dos módulos fotovoltaicos e das baterias em corrente alternada,

através da utilização de inversores. Eles operam com tensões de entrada de 12, 24, 48, 120 V (CC) e outras. Que normalmente são convertidos para 110 ou 220 V (AC) na frequência de 60 Hz. Os inversores são dimensionados levando-se em conta a tensão dos equipamentos, a potência total da carga CA instalada no sistema, a frequência e a forma de onda. Para potências elevadas, recomenda-se utilizar inversores trifásicos. As formas de onda são a quadrada, a retangular e a senoidal, esta última construída utilizando a tecnologia PWM (*Pulse Width Modulation*), ou modulação por largura de pulso, que produz uma sequência de pulsos com largura variável para reproduzir uma onda senoidal. A forma de onda é um fator que caracteriza a qualidade e custo relativo do inversor. Ela depende do modo de conversão e do sistema de filtragem de ruídos gerados. A Figura 33 apresenta os tipos de formas de onda geradas pelos inversores [8].

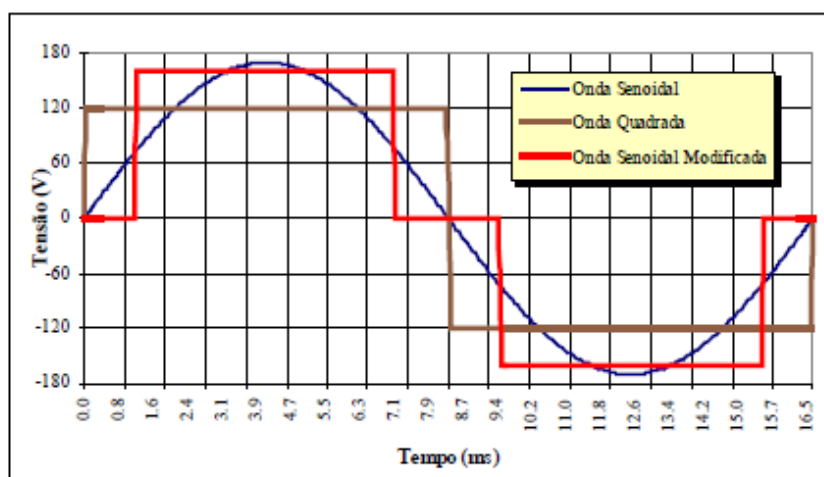



Figura 33 - Onda Senoidal, Quadrada e Retangular.

(Fonte: “Luis Horacio Vera – 2004”)

Para sistemas interligados a rede elétrica, o inversor deve produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo com a rede, dissipando o mínimo de potência.

Para sistemas de potência elevada, o uso de inversores é fundamental, pois se pode gerar uma tensão CA alta, reduzindo a corrente e diminuindo a seção dos cabos facilitando a transmissão e reduzindo o custo de cabeamento [4].

Os inversores são construídos por circuitos eletrônicos de chaveamento que chaveiam a entrada CC e produzem uma saída CA de frequência determinada. A

Figura 34 descreve o esquema elétrico de um sistema fotovoltaico autônomo com inversor [4].

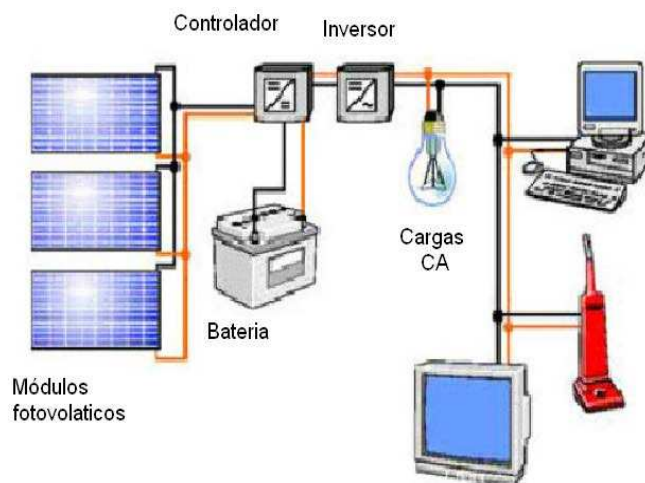



Figura 34 - Sistema Autônomo com Inversor.

(Fonte: “Susana Freitas – MEI 2008“)

2.9 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são utilizados quando é necessária tensão CC diferente da produzida pelo conjunto de módulos e baterias. Como apresentado na Figura 35, utiliza-se no mesmo sistema fotovoltaico, equipamento CC com tensão de 12 V e 24 V [8].

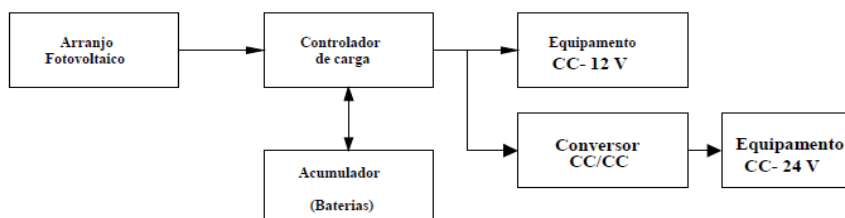



Figura 35 - Conversor CC-CC.

(Fonte: “Luis Horacio Vera – 2004”)

2.10 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias:

Sistema autônomo: Sistema puramente fotovoltaico que utiliza uma forma de armazenamento de energia como baterias ou podem fornecer tensão contínua diretamente para a carga. São caracterizados principalmente por instalações elétricas distantes dos centros urbanos onde seria inviável levar energia por distribuição normal a cabos, como antenas de telecomunicações em locais remotos. A Figura 36 descreve o esquema elétrico de um sistema fotovoltaico autônomo [4].

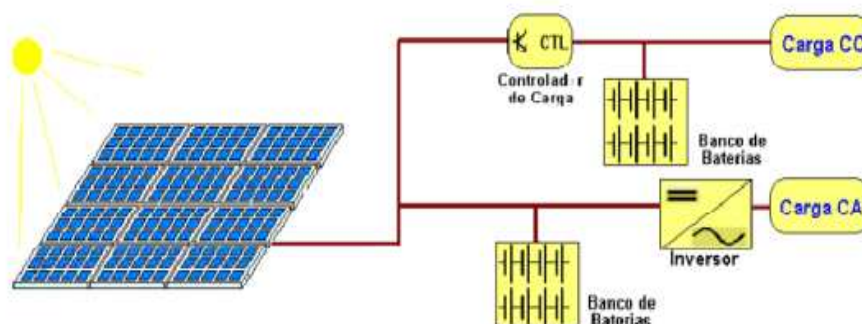



Figura 36 - Sistema Autônomo.

(Fonte: “Susana Freitas – MEI 2008“)

Sistema conectado a rede elétrica: Utiliza normalmente grandes números de módulos fotovoltaicos entregando a geração diretamente a rede elétrica funcionando como uma fonte de energia complementar ao sistema elétrico de potência. Necessitam de inversores que possuem a capacidade de gerar uma onda em sincronismo com a rede elétrica. Atualmente é crescente um mercado de micro-produtores, onde se pode instalar sistemas renováveis como a energia solar em residências e vender o excedente para as concessionárias de energia elétrica. A Figura 37 apresenta o esquema elétrico de um sistema fotovoltaico conectado a rede [4].

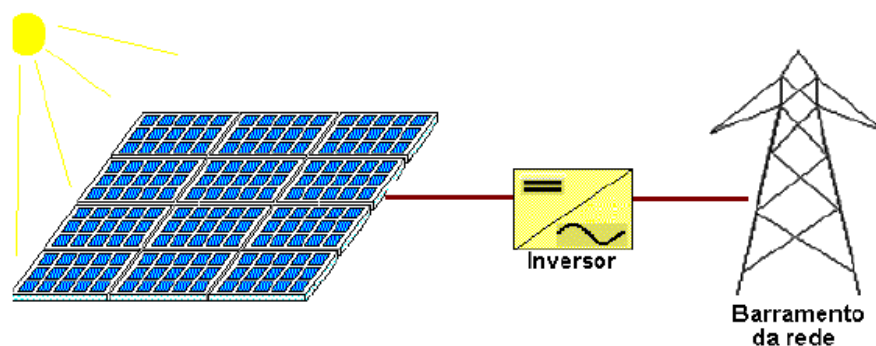



Figura 37 - Sistema Conectado á Rede.

(Fonte: “Susana Freitas – MEI 2008“)

Sistemas híbridos: São sistemas desconectados da rede que possuem, além de módulos fotovoltaicos, outras fontes de geração de energia com geradores diesel e eólico por exemplo. A Figura 38 mostra o esquema elétrico de um sistema fotovoltaico híbrido [4].

Figura 38 - Sistema Híbrido.

(Fonte: “Susana Freitas – MEI 2008“)

3 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos se baseia basicamente em obter a potência instalada e o consumo máximo necessário para calcular a quantidade e características dos módulos, baterias, inversores, controladores de carga e condutores.

É preciso ter uma relação correta entre a energia fornecida pelo Sol e a demanda de energia necessária pela carga.

Um sistema fotovoltaico deve ter robustez, fácil instalação e manutenção, principalmente os sistemas autônomos instalados em locais remotos.

3.1 Recurso Solar

O primeiro passo é a avaliação do recurso solar na localidade da instalação. O Brasil possui uma localização e um clima privilegiado para o aproveitamento da radiação solar na produção de energia elétrica. A radiação solar e a insolação diária variam de acordo com a região do país e precisa ser levada em conta, para isso têm-se os mapas solares de radiação e insolação diária, onde se verifica os valores corretos para o mês na região que será instalado o sistema fotovoltaico. Os dados comumente utilizados são especificados em valores médios mensais da energia acumulada no dia.

Uma forma conveniente de se expressar o valor acumulado de energia solar ao longo de um dia é através do número de horas de **Sol Pleno** (SP), que mede o número de horas em que a radiação solar permanece constante e igual a 1 kW/m^2. Assim, para um local em que a radiação diária acumulada é de 8 kWh/m^2, o número de horas de Sol Pleno é: [2]

$$SPm = \frac{\mathbf{8}}{\mathbf{1}}\frac{kW\boldsymbol{h}}{m^{\mathbf{2}}}\frac{kW}{m^{\mathbf{2}}} = 8h\ dia$$

O Cepel possui mapas solares de insolação diária para o Brasil, como ilustra a Figura 39, assim, uma outra forma de calcular o SP é usando a média entre a informação da insolação fornecida pelo mapa solar de insolação e o cálculo através da radiação solar na região.

$$SPm = \frac{SP + In}{2}$$

Sendo:

SPm - o número de horas de Sol Pleno através da radiação e da insolação.

SP - o número de horas de Sol Pleno calculada através da radiação.

In - a insolação fornecida pelo mapa solar de insolação diária.

Os dados de radiação fornecidos pelos mapas solares estão em MJ/m^2.dia, neste caso deve-se multiplicar por 0,27778 para transformar para kWh/m^2.dia.

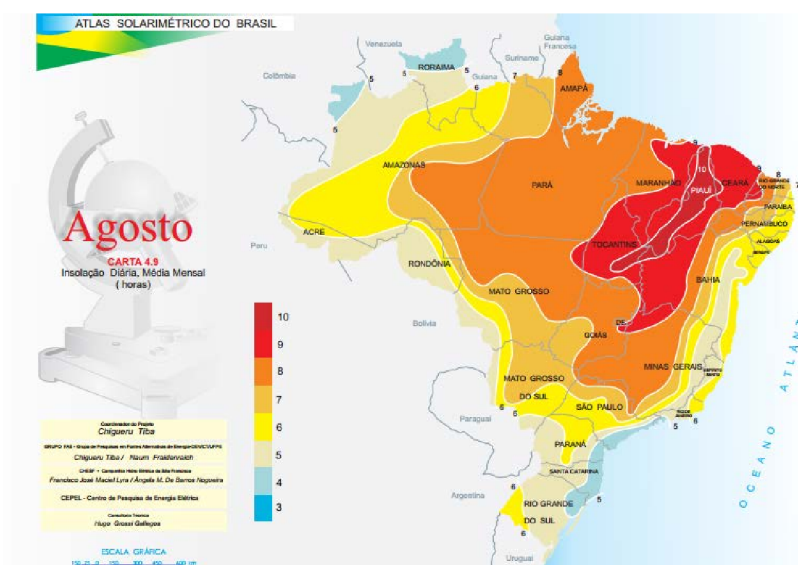



Figura 39 - Mapa Solarimétrico de Insolação Média para o Brasil.

(Fonte: CEPEL)

3.2 Carga Instalada

Para especificar a carga de um sistema fotovoltaico, calcula-se o seu consumo diário de energia. Para isto deve ser feito um levantamento de carga da instalação, construindo uma tabela com o nome do equipamento, sua potência, quantidade e o número de horas que ele ficará ligado por dia. Também é fundamental saber se ele é de corrente alternada ou contínua, pois seu consumo poderá entrar ou não no cálculo de dimensionamento dos inversores.

A energia diária utilizada é dada em (Wh), que é a potência do equipamento multiplicada pelo número de horas diárias de uso: [10]

$$E = \sum (P \times T \times q)$$

Sendo:

E - a Energia total necessária diariamente.

P - a Potência (W) do equipamento.

T - o Tempo (h) de utilização diária.

q - a quantidade do equipamento.

Assim calcula-se o consumo total em Wh, somando a energia consumida por cada equipamento, a potência total das cargas CA e a potência total das cargas CC.

Para equipamentos com consumos extremos, como motores em que a corrente de partida pode ser 6 vezes a corrente nominal, o usuário precisa ter sensibilidade na inserção dos dados.

Deve-se escolher a tensão em que o banco de baterias irá operar.

É necessário escolher a configuração básica do sistema, se ele é autônomo com ou sem armazenamento ou se ele é interligado a rede elétrica.

3.3 Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos

Normalmente ao dimensionar um sistema fotovoltaico, tem-se a disposição os módulos fotovoltaicos que serão utilizados, caso contrário, deve-se fazer uma breve análise em torno de todo o sistema que a ser dimensionado e escolher aquele que for mais conveniente, levando em conta os custos do mesmo.

Com base nos dados fornecidos pelo fabricante do módulo, calcula-se a energia que poderá ser produzida pelo mesmo. Os rendimentos dos módulos fotovoltaicos variam entre 85% e 95%, como regra, pode-se escolher um rendimento médio de 90% [10]. Para o cálculo da energia produzida por um módulo, deve-se levar em conta se o sistema possui controlador MPPT ou não.

Para sistemas sem MPPT a energia produzida pelo módulo é:[10]

$$Eprod = 0{,}9 \times Isc \times Vm \times SPm$$

Na qual:

Isc - a Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico.

Vm – a tensão nominal do módulo fotovoltaico.

Para sistemas com MPPT, a energia produzida pelo módulo é: [10]

$$Eprod = Wp \times SPm$$

Sendo:

Wp - a potência máxima do módulo fotovoltaico.

O número de módulos em paralelo é dado por: [10]

$$Npp \geq \frac{E}{Eprod}$$

E o número de módulos em série: [10]

$$Nps \geq \frac{Vb}{V}$$

Sendo:

Vb - a tensão do banco de baterias.

A capacidade máxima em (Ah) do sistema é dada por: [10]

$$Cmax = \frac{E}{Vb}$$

3.4 Dimensionamento das Baterias

Para a escolha das baterias, precisa-se fazer uma análise do sistema e escolher o tipo de bateria que melhor adapta as características do sistema. Também precisa definir os números de dias em que o sistema poderá suportar sem insolação, chamado de autonomia, como em dias nublados, sendo que nestes dias o sistema será alimentado apenas pelas baterias. Define-se também a profundidade de descarga das baterias e a tensão de operação do sistema que Juntamente com a autonomia são fundamentais para dimensionar o banco de baterias. Recomenda-se uma margem de segurança de 10% para o cálculo da capacidade do banco de baterias devido a perdas [10].

A capacidade do banco de baterias é descrita por: [10]

$$Cb = 1{,}1 \times Cmax \times \frac{At}{Ad \times Pd}$$

Sendo:

At - a autonomia do sistema.

Ad - o coeficiente de auto descarga das baterias diário.

Pd - a profundidade de descarga das baterias.

O número de baterias em paralelo é dado por: [10]

$$Nbp \geq \frac{Cb}{Cbat}$$

Na qual:

Cbat - a capacidade da bateria individual.

O número de baterias em série é dado por: [10]

$$Nbs \geq \frac{Vb}{Vbat}$$

Onde:

Vbat - a tensão nominal da bateria escolhida.

3.5 Dimensionamento dos Controladores de Carga

Para dimensionamento do controlador de carga, precisa-se da tensão de funcionamento do sistema e da corrente elétrica que será fornecida.

A tensão do controlador deve suportar a tensão do banco de baterias.

Recomenda-se um fator de segurança para que o controlador não trabalhe no máximo de sua capacidade. É recomendada uma margem de segurança de 10% devido a perdas e rendimento do sistema com controlador de carga [10].

A corrente mínima que o arranjo de controladores de carga deve suportar é dada por: [10]

$$IC = 1{,}1 \times Isc \times Npp$$

Caso a capacidade do controlador escolhido seja menor que a capacidade necessária, será preciso mais de um controlador de carga.

O número de controladores necessários é dado por: [10]

$$Nc \geq \frac{IC}{Cc}$$

Sendo:

Cc - a capacidade do controlador individual.

3.6 Dimensionamento dos Inversores

Para o dimensionamento do inversor, precisa-se saber quais as cargas são de corrente alternada, assim tem-se a potência do inversor além da sua tensão de operação. Caso a potência do inversor seja menor que a potência das cargas CA, será necessário mais de um inversor. O rendimento dos inversores se compreende entre 85 e 95%, sendo necessária uma margem de segurança de 10% na escolha da sua capacidade.

O número de inversores necessários é dado por: [10]

$$Ni \geq \frac{Pca}{Pi}$$

Na qual,

Pca - a potência total das cargas CA.

Pi - a potência do inversor escolhido.

3.7 Escolhas

É importante adequar a escolha de algumas variáveis no dimensionamento de modo a encontrar valores compatíveis com equipamentos disponíveis no mercado, por exemplo, é preferível, para um sistema que utiliza inversor, uma tensão do banco de baterias alta, pois de acordo com a potência do sistema, é necessário um inversor de maior capacidade, que possui maior custo, pode-se ajustar isso simplesmente aumentando a tensão do banco de baterias. É possível observar um caso semelhante para o controlador no sistema descrito na Figura 40, que precisa utilizar um controlador de carga com uma corrente de 80 A, sendo que apenas ajustando a ligação dos equipamentos, a corrente é reduzida para 40 A conforme ilustra a Figura 41.

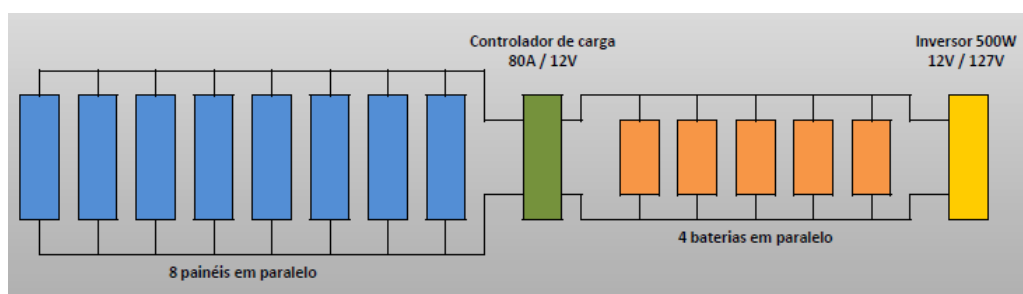



Figura 40 - Controlador de Capacidade Elevada.

(Fonte: “Curso de Energia Solar Fotovoltaica” Warley Teixeira Guimarães)

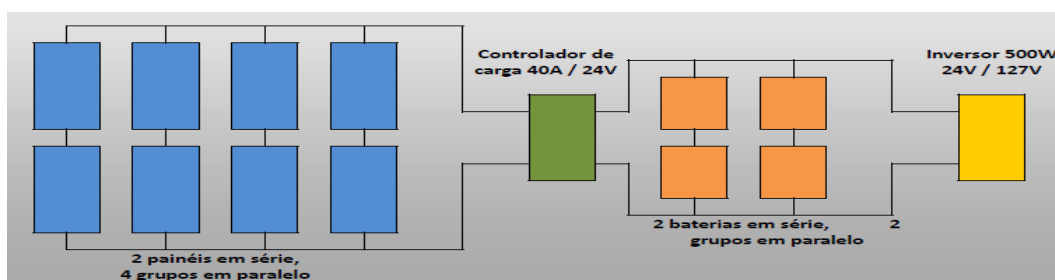



Figura 41 - Controlador de Capacidade Reduzida.

(Fonte: “Curso de Energia Solar Fotovoltaica” Warley Teixeira Guimarães)

3.8 Condutores e Proteções

É de fundamental importância citar que o objetivo deste trabalho não visa desenvolver o estudo detalhado das instalações elétricas destes sistemas. As instalações elétricas dos sistemas fotovoltaicos devem cumprir os requisitos mínimos exigidos pelas normas vigentes, como a ABNT (NBR 5410) sendo que são diferenciadas nas instalações CA e CC [11].

Os condutores que ligam os módulos fotovoltaicos a uma caixa de junção CC são chamados de cabos de fileira. Recomenda-se que as polaridades positiva e negativa sejam independentes não sendo agrupadas lado a lado. Entre a caixa de junção e o inversor, está o condutor principal CC que para efeitos de proteção e manutenção, necessita de um interruptor principal conforme a norma IEC 60364-7-712, “Instalações elétricas nos edifícios – requisitos para instalações ou localizações especiais – sistemas solares fotovoltaicos”. O cabeamento CA liga o inversor até o ponto de conexão do sistema CA através de um dispositivo de proteção. No dimensionamento dos cabos CC é importante levar em consideração reduzir o máximo as perdas que não devem ser superior a 3% da tensão de trabalho. A Figura 42 descreve um resumo da instalação elétrica de um sistema fotovoltaico [11].

Para sistemas interligados a rede elétrica, recomenda-se usar a “RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012”, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica [3].

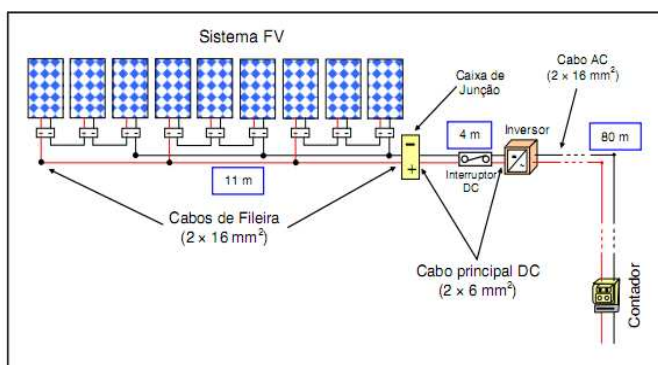



Figura 42 - Instalação elétrica de um Sistema Fotovoltaico.

(Fonte: Joaquim Carneiro – 2009)

4 O SOFTWARE

O *software* FOTOGERA foi criado utilizando a função GUIDE do MATLAB® para a criação das interfaces gráficas e programação dos cálculos de dimensionamento do sistema fotovoltaico.

4.1 Ferramenta Utilizada

O MATLAB®, criado no fim dos anos 1970 por Cleve Moler (*Math Works, inc*.) é um *software* reconhecido mundialmente como uma das melhores ferramentas para processamento matemático, não sendo apenas um pacote de computação e plotagem, ele conta com diversas extensões chamadas *toolboxes* que o tornam muito versátil e poderoso. Com estas opções, o MATLAB® é uma vantajosa ferramenta que permite usuários com capacidades elementares de programação produzir gráficos complexos e resolver problemas de elevado grau de dificuldade.

O MATLAB® também possui a capacidade de produzir interfaces gráficas com o usuário (GUIs), que provê um ambiente familiar para o trabalho do usuário, fornecendo recursos com janelas, botões, menus entre outros. Para os casos em que a interface será utilizada por outros, ela pode facilitar o entendimento do programa, a entrada de dados e a demonstração dos resultados.

Para criar interfaces gráficas de modo simplificado, utiliza-se a função GUIDE do MATLAB®, onde a GUI (*graphical user interface)* é criada com a função GUIDE e programada conforme a necessidade do usuário.

O Guide (*graphical user interface development environment*) ou ambiente de criação de interfaces gráficas com o usuário, fornece um conjunto de ferramentas que simplificam o processo de diagramação e programação das GUIs. A Figura 43 apresenta os elementos básicos de uma GUI.

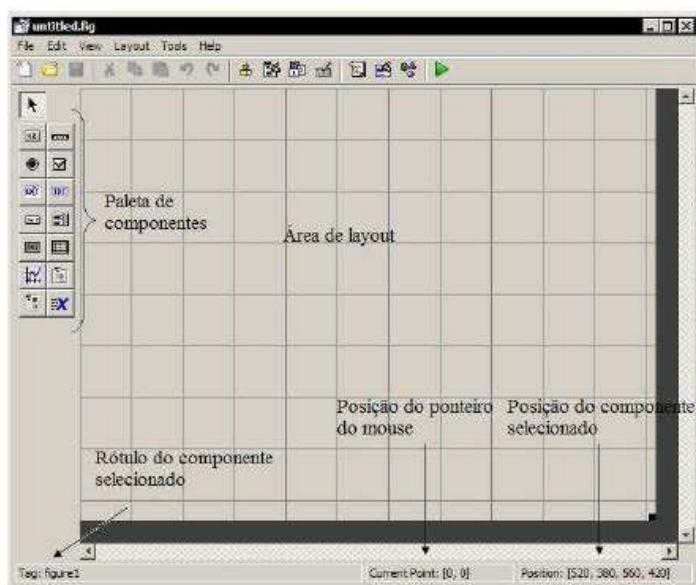



Figura 43 - Elementos Básicos da Função Guide.

Quando uma GUI é criada no Guide, são criados dois arquivos: o arquivo da interface gráfica (.fig) e outro arquivo contendo funções que controlam como a GUI funciona (.m). Este último fornece códigos para iniciar a GUI e contém a estrutura para as rotinas que são executadas quando o usuário interage com um componente da GUI, denominados de *callbacks.* A Figura 44 ilustra a linha de programação de uma GUI.

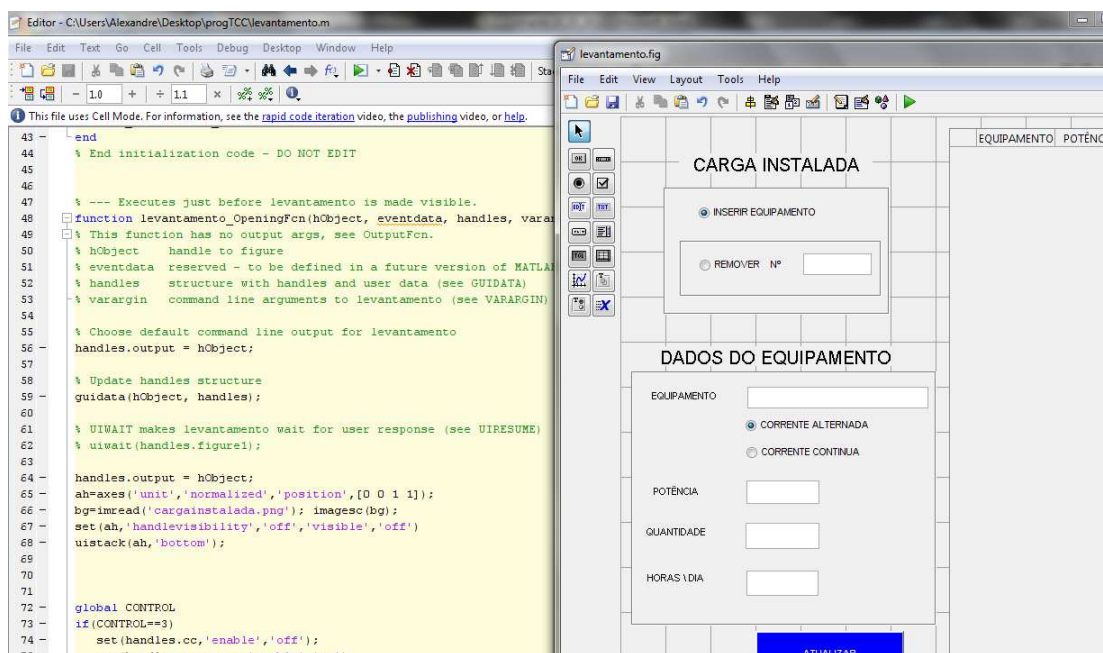



Figura 44 - GUI e Linhas de Programação.

Além disto, o MATLAB® permite a criação de um arquivo executável para que o programa desenvolvido possa ser utilizado em qualquer computador, não sendo necessário o MATLAB® instalado.

4.2 Configurações Básicas

Ao abrir o *software* FOTOGERA, será apresentado o ambiente que ilustra a Figura 45, que é o passo inicial para dimensionar um sistema fotovoltaico. Este ambiente trata das configurações básicas do sistema, nele, seleciona-se o tipo de dimensionamento, sistema conectado a rede elétrica de distribuição ou um sistema autônomo. Os sistemas autônomos podem ser divididos entre “com armazenamento” e “sem armazenamento“.

Ao clicar no botão “MANUAL”, será aberto um arquivo com o trabalho manuscrito desenvolvimento juntamente com o *software* que pode ser usado para adquirir conhecimentos básicos sobre sistemas fotovoltaicos e manual de instruções para operação do *software*.

Para selecionar o tipo de configuração básica do sistema, basta clicar no respectivo *radio button* que é o circulo na frente da configuração, ele fica marcado ao clicar. Para alterar a configuração, basta clicar no outro *radio button* sendo que o anterior será desmarcado automaticamente. Para avançar no *software*, basta selecionar a configuração básica e clicar no botão “INICIAR PROJETO”. Ao clicar neste botão, caso não seja selecionado nenhuma configuração básica, o sistema impede o avanço e envia ao usuário uma mensagem de erro abrindo uma nova janela conforme ilustra a Figura 46, assim basta reconhecer o erro clicando em “OK” na janela, selecionar a configuração e avançar.

Figura 45 - Ambiente Inicial para Configurações Básicas.

Figura 46 - Mensagem de ERRO no Ambiente Inicial.

O *software* funciona como um passo a passo, de acordo com a configuração selecionada, ele guia o usuário de um modo diferente, liberando somente janelas de texto e ambientes pertinentes a respectiva configuração selecionada, assim, ao dimensionar um sistema sem cargas CA, o ambiente de dimensionamento do inversor não será apresentado. Também é necessário que os valores de variáveis inseridos no *software* não inteiros, sejam separados por “ponto” e não por “vírgula”, visto que o MATLAB® não aceita “vírgula”.

4.3 Potencial Energético e Localização

Após ser escolhida a configuração básica do sistema fotovoltaico, será aberto um novo ambiente, este que trabalha o potencial energético solar da região onde será instalado o sistema fotovoltaico, sua localização e se possui controlador com MPPT, que é apresentado na Figura 47.

Muitos sistemas fotovoltaicos não são utilizados o ano inteiro, como por exemplo, instalações de expedições em locais isolados e estruturas temporárias em locais isolados, assim, é possível neste software escolher para sistemas fotovoltaicos autônomos quais os meses o sistema será utilizado.

No ambiente de radiação é necessário inserir o valor de radiação solar e insolação diária para a localidade onde o sistema será instalado. Alguns autores utilizam como critério o pior valor de radiação dentre os meses selecionados para a utilização do sistema, isto faz com que ao utilizar o pior caso para o cálculo de dimensionamento do sistema, se exclui a possibilidade de ficar sem energia devido a falta de radiação. Outros autores utilizam a média entre as radiações dos meses selecionados, pois assim, é possível aproveitar a capacidade do sistema fotovoltaico nos meses de maior radiação incidente. O FOTOGERA deixa a critério do usuário selecionar a utilização do pior valor de radiação ou o valor médio.

Para os sistemas fotovoltaicos autônomos, o *software* possibilita ao usuário dimensionar o sistema utilizando o pior valor de radiação ou a média dentre os meses selecionados bastando selecionar o *radio button* “VALOR MÉDIO” ou o “MENOR VALOR”, sendo o “VALOR MÉDIO” pré-selecionado. Com o *radio button* “VALOR MÉDIO” selecionado, os radio button de seleção dos meses são habilitados.

Primeiro deve-se selecionar os meses que o sistema será utilizado durante o ano, bastando marcar o *radio button* referente ao mês escolhido, se ele for utilizado por todo o ano basta selecionar a opção “todos os meses“, sendo que a marcação dos *radio button* entre essas duas opções se alteram automaticamente.

Figura 47 - Ambiente de Potencial Energético e Localização.

Ao clicar na opção desejada, as caixas de inserção dos dados de radiação e insolação da região localizadas na frente da opção serão habilitadas.

No centro do ambiente, no painel “VISUALIZAR MAPAS SOLARES“ ao clicar nos botões indicados com meses do ano, abrirá uma janela ilustrando o mapa de intensidade de radiação solar do Brasil do respectivo mês ou o mapa de insolação diária (media mensal) em horas, assim, basta visualizar os valores para a região em que o sistema será instalado e inserir nos respectivos campos de cada mês. Também se pode visualizar o mapa da média anual, assim se o sistema for utilizado durante todo o ano, basta visualizar este mapa e inserir a média anual, dispensando o trabalho de inserir mês a mês. O valor de radiação e insolação média ou o pior valor são apresentados para o usuário nas caixas de texto “RADIAÇÃO MÉDIA” e “INSOLAÇÃO DIÁRIA MÉDIA” ou nas caixas de texto “MENOR RADIAÇÃO” e “MENOR INSOLAÇÃO” de acordo com o modo selecionado pelo usuário, sendo localizadas no lado direito superior do ambiente.

Para os sistemas conectados a rede elétrica convencional é utilizado somente a média de radiação do ano, pois os sistemas interligados a rede são sistemas normalmente instalados durante o ano todo, assim o *software* desabilita automaticamente a opção de selecionar o pior valor de radiação mantendo o *radio button* “VALOR MÉDIO” constantemente selecionado. Ele também desabilita a

possibilidade de selecionar meses separados para a utilização do sistema desativando todos os *radio button* dos meses do ano, ficando liberado somente o da média anual, assim o usuário pode visualiza os mapas solares de radiação e insolação anual e inserir no respectivo campo.

Os sistemas interligados a rede elétrica necessitam de inversores especiais que possibilitem o sincronismo com a rede elétrica convencional, estes inversores possuem internamente controladores MPPT, assim ao selecionar no ambiente inicial um sistema conectado, a opção de seleção de controlador MPPT já é pré-selecionada na opção “SISTEMA COM MPPT” não permitindo alteração, visto que o modo de cálculo da energia gerada pelo módulo fotovoltaico se altera.

No painel “INSERIR LATITUDE“, pode-se clicar no botão “MAPA DE LATITUDE“ que abrirá uma janela com o mapa de latitude do Brasil conforme apresenta a Figura 48. Deve-se verificar a localidade que será instalada o sistema e inserir no campo abaixo do botão o valor aproximado do módulo da latitude do local.

Figura 48 - Mapa de Latitude do Brasil.

(Fonte: IBGE)

A latitude do local de instalação do sistema é um método satisfatório para o cálculo do ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos em relação a horizontal.

De acordo com os meses que foram selecionados para o uso do sistema, pode-se ter uma maior utilização do sistema nos meses próximos do verão ou nos meses próximos do inverno, o *software* verifica com base nos meses inseridos e altera o ângulo de inclinação para que o sistema seja mais efetivo ao longo de todo o ano. Caso o sistema seja usado o ano inteiro, como é o caso dos sistemas conectados a rede elétrica convencional, o ângulo de inclinação será igual a latitude do local.

O *software* altera o ângulo de inclinação de acordo com a seguinte regra:

Para latitudes entre 0 e 9º, o ângulo de inclinação é igual a latitude do local.

Para latitudes entre 10 e 19º, se o sistema for usado predominantemente nos meses quentes, o ângulo de inclinação será a latitude subtraída de 5º. Se o sistema for usado predominantemente nos meses frios, o ângulo de inclinação será a latitude somada de 5º.

Para latitudes entre 20 e 29º, se o sistema for usado predominantemente nos meses quentes, o ângulo de inclinação será a latitude subtraída de 10º. Se o sistema for usado predominantemente nos meses frios, o ângulo de inclinação será a latitude somada de 10º.

Para latitudes entre 30 e 34º, se o sistema for usado predominantemente nos meses quentes, o ângulo de inclinação será a latitude subtraída de 15º. Se o sistema for usado predominantemente nos meses frios, o ângulo de inclinação será a latitude somada de 15º.

Os valores de latitude para o Brasil variam, em módulo, entre 0 e 34º, portanto deve-se inserir valores corretos para a localização, caso o valor inserido não esteja nessa faixa, ao clicar no botão “AVANÇAR“, o sistema gera uma mensagem de erro abrindo uma janela, como ilustra a Figura 49. Basta reconhecer o erro clicando em “OK“ e corrigir o valor de latitude inserido.

Figura 49 - Mensagem de Erro na inserção de dados de Latitude.

Os módulos fotovoltaicos devem ser orientados com a ajuda de uma bússola, sendo que no hemisfério sul, eles devem ser orientados para o norte geográfico e no hemisfério norte, orientados para o sul geográfico.

Os dados de radiação solar incidente e insolação diária foram obtidos do Atlas solarimétrico construído pelo CEPEL (centro de pesquisas de energia elétrica).

Após inserir os valores de radiação e insolação nos referidos campos, é preciso clicar no botão “SELECIONAR“. Os valores de radiação média e insolação diária média serão calculados pelo sistema e apresentadas para o usuário.

Os valores de radiação média para o Brasil estão entre 6 e 24 MJ/m^2.dia. Portanto devem-se inserir valores dentro desta faixa nos campos de inserção de dados de radiação, caso seja inserido um valor fora desta faixa, ao clicar no botão “AVANÇAR“, o sistema envia uma mensagem de erro ao usuário abrindo uma janela, como apresenta a Figura 50.

Figura 50 - Mensagem de ERRO para valores de Radiação Média Incoerentes.

Os valores de insolação média para o Brasil estão entre 4 e 10 horas dia. Portanto deve-se inserir valores dentro desta faixa nos campos de inserção de dados de insolação, caso seja inserido um valor fora desta faixa, ao clicar no botão “AVANÇAR“, o sistema envia uma mensagem de erro ao usuário abrindo uma janela, como mostra a Figura 51.

Figura 51 - Mensagem de ERRO para valores de Insolação Diária Média Incoerentes.

Nestes casos, basta reconhecer o erro clicando em “OK“ e corrigir os dados incoerentes, clicando novamente no botão “AVANÇAR“.

É preciso selecionar se o sistema possui ou não controlador MPPT, para sistemas autônomos, o *software* deixa o *radio button* pré selecionado na opção “SISTEMA SEM MPPT” visto que normalmente este controlador é utilizado em grandes projetos que justificam seu custo.

4.4 Carga da Instalação

Após inserir o recurso solar, é necessário delinear a quantidade de energia que o sistema fotovoltaico deverá fornecer.

Para os sistemas conectados a rede elétrica convencional, será aberto o ambiente apresentado na Figura 52.

Figura 52 – Ambiente de Consumo Para Sistemas Conectados.

Neste ambiente é possível selecionar no painel “BASE DE CÁLCULO” as opções mostradas na Figura 52, a opção “CONSUMO A GERAR” habilita a caixa de texto “VALOR MENSAL A GERAR” onde deve-se inserir a quantidade de energia elétrica desejada para que o sistema fotovoltaico gere mensalmente, assim, pode-se por exemplo inserir o consumo de energia mensal de uma residência verificado na conta mensal de energia elétrica dimensionando um sistema para gerar energia para auto sustentar a residência, também sendo possível inserir um valor maior para que o excedente seja “vendido” para a concessionária de energia gerando créditos energéticos conforme a resolução da ANEEL citada no trabalho, ou inserir um valor menor que irá contribuir com o consumo mensal da residência. Ao selecionar a base de cálculo “MÓDULOS FOTOVOLTAICOS”, a caixa de texto “Nº DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS” é habilitada, assim pode-se estimar a quantidade de energia a ser gerada já possuindo um numero determinado de módulos fotovoltaicos que deverá ser inserido neste campo. Para este caso é possível que o numero de módulos utilizados pelo sistema seja diferente do numero inserido pelo usuário, pois é necessário a formação de um arranjo perfeito de acordo com os critérios selecionados. O sistema identifica automaticamente esta possibilidade e exclui os módulos excedentes, devendo o usuário verificar no ambiente final.

É necessário inserir a tensão de trabalho que é a tensão do arranjo fotovoltaico e o valor da tensão de saída do sistema de corrente alternada que será igual ao valor da tensão de fornecimento da concessionária de energia elétrica.

Caso o usuário insira um valor mensal de energia a gerar igual a zero, o sistema envia uma mensagem de erro conforme apresenta a Figura 53, para normalizar, basta clicar no botão “OK” e corrigir, clicando no botão “AVANÇAR”.

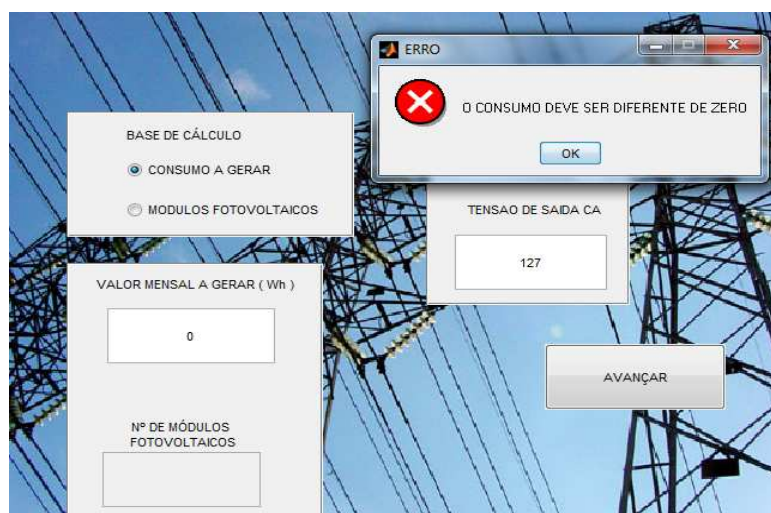



Figura 53 – Mensagem de Erro Para Consumo Igual a Zero.

Caso o usuário insira um valor para a tensão de trabalho igual a zero, o sistema gera uma mensagem de erro conforme apresenta a Figura 54.

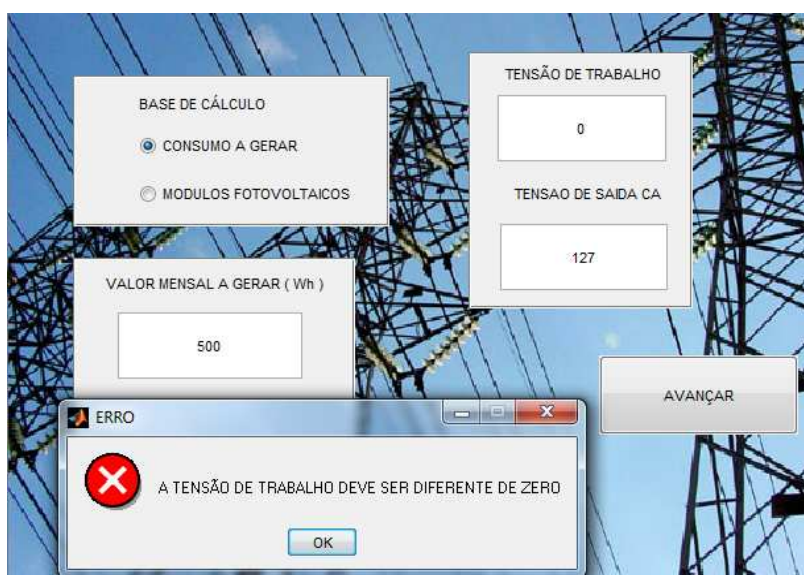



Figura 54 – Mensagem de Erro Para Tensão de Trabalho Igual a Zero.

Caso o usuário insira um valor para a tensão de saída CA igual a zero, o sistema gera uma mensagem de erro conforme apresenta a Figura 55.

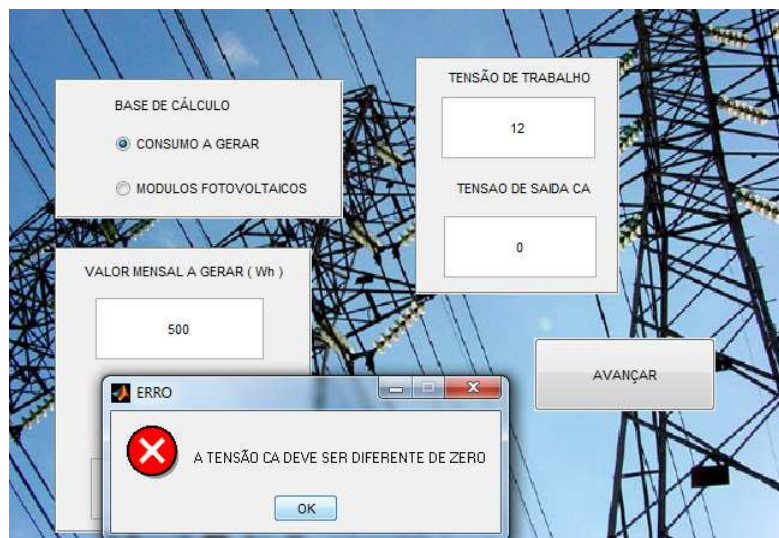



Figura 55 – Mensagem de Erro Para Tensão CA Igual a Zero.

Para continuar, basta clicar no botão “AVANÇAR”.

Caso o usuário selecione um sistema autônomo no ambiente inicial, o ambiente acima não será apresentado, sendo apresentado o ambiente de levantamento de carga apresentado na figura 56.

Figura 56 - Ambiente de Levantamento de Carga Instalada.

Neste ambiente, é preciso inserir todos os equipamentos alimentados pelo sistema construindo automaticamente uma tabela de carga. Para isto o *radio button*

“INSERIR EQUIPAMENTO“ já está pré selecionado, assim basta digitar na caixa de texto referente, o nome do equipamento, sua potência elétrica, quantidade, tempo de utilização durante o dia e tipo de alimentação (corrente contínua ou alternada). O *radio button* “CORRENTE ALTERNADA“ já está pré selecionado. Ao clicar em atualizar, este equipamento será adicionado a lista de carga. Para remover um equipamento basta selecionar o *radio button* “REMOVER ” e indicar seu respectivo número que é apresentado na tabela de carga. Ao clicar em “ATUALIZAR“, ele irá desaparecer da lista.

Os *radio button* alteram automaticamente entre as opções inserir e remover equipamento e entre corrente alternada e corrente contínua, assim ao clicar em “CORRENTE CONTÍNUA“, o *radio button* “CORRENTE ALTERNADA” será desmarcado. Caso no ambiente inicial seja selecionado sistemas interligados a rede elétrica pública, o *software* bloqueia o *radio button* “CORRENTE CONTÍNUA“, não sendo possível inserir cargas CC, sendo a energia excedente produzida pelos módulos fotovoltaicos injetada totalmente na rede elétrica, sendo assim, cargas CC deverão utilizar fontes de conversão CA-CC.

A lista de carga é ilustrada na Figura 57 onde se visualiza uma tabela com todos os dados dos equipamentos inseridos pelo usuário.

	EQUIPAMENTO	POTÊNCIA	TOTAL	HORAS \ DIA	TOTAL Wh	TIPO
1	lampada fluor	15	10	4	600	CA
2	computador	150	1	4	600	CA
3	televisor	200	2	3	1200	CA
4	aquecedor	1000	1	2	2000	CC
5	led	8	6	5	240	CC
6	ventilador	50	2	6	600	CA
7	dvd	35	1	1	35	CA

Figura 57 - Lista de Carga Inserida pelo Usuário.

Para alguns casos de inserção de dados incoerentes, o sistema gera mensagens de erro, se for inserido um equipamento e o usuário colocar a potencia igual a zero, ao clicar no botão “ATUALIZAR“, é gerada uma mensagem de erro conforme ilustra a Figura 58.

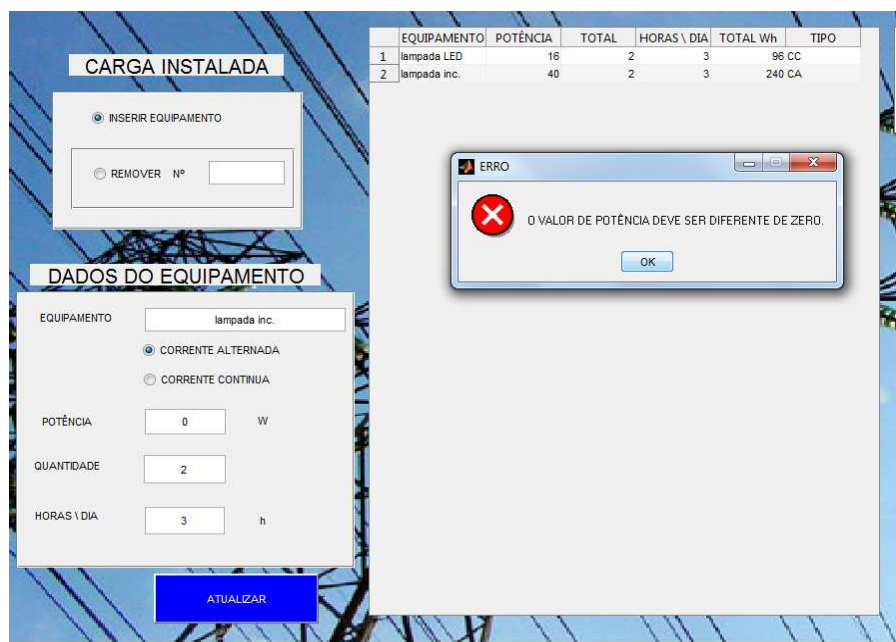



Figura 58 - Mensagem de Erro na inserção da Potência do Equipamento.

Caso o usuário insira uma quantidade igual a zero, ao clicar no botão “ATUALIZAR“, também é gerada uma mensagem de erro abrindo uma janela conforme apresenta a Figura 59.

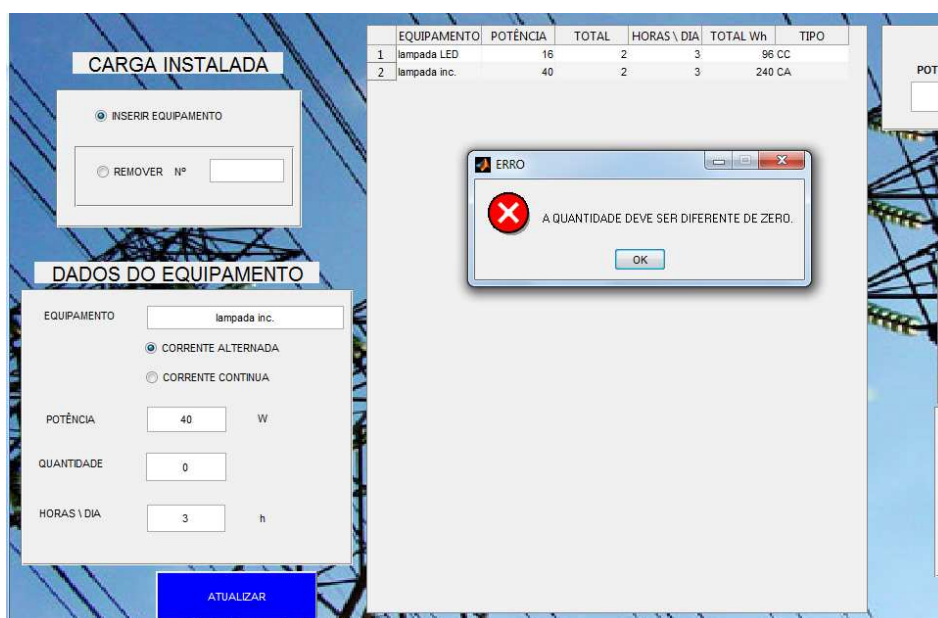



Figura 59 - Mensagem de Erro na inserção da Quantidade do Equipamento.

Caso o usuário insira uma quantidade de HORAS\DIA igual a zero, ao clicar no botão “ATUALIZAR“, é gerada uma mensagem de erro abrindo uma janela, como

mostra a Figura 60, informando que o valor deve estar compreendido entre 0 e 24 horas.

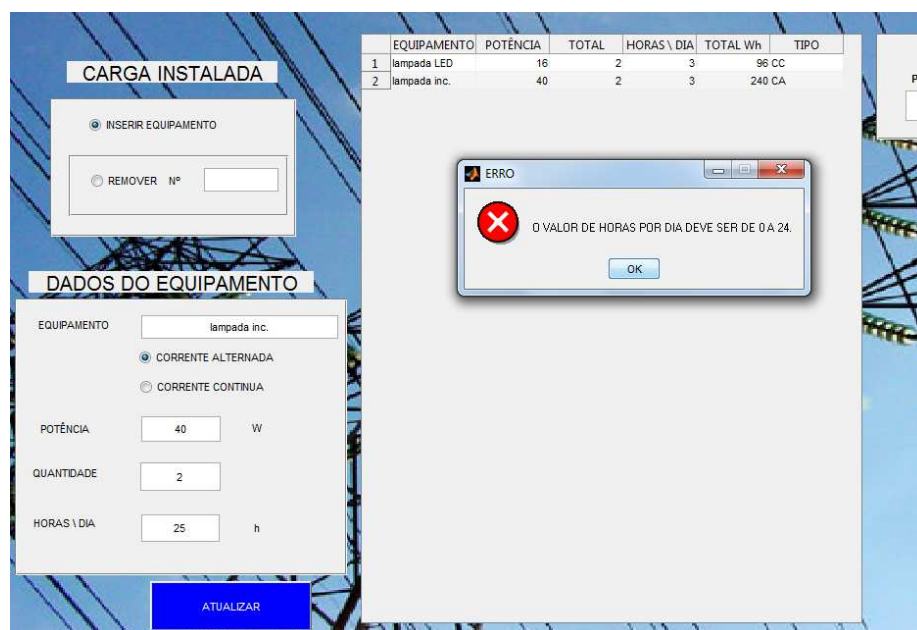



Figura 60 - Mensagem de Erro na inserção da Quantidade de Horas de Uso por Dia.

Caso o usuário tente remover um equipamento que não está na lista de carga, ao clicar no botão “ATUALIZAR“, é gerada uma mensagem de erro abrindo uma janela, como ilustra a Figura 61, informando que este equipamento é inexistente.

Figura 61 - Mensagem de Erro ao Remover Equipamento Inexistente.

O *software* calcula o consumo diário necessário, o que é de fundamental importância para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico e o separa para os equipamentos de corrente contínua e corrente alternada que será fundamental para

o dimensionamento do inversor. Esses valores são apresentados no ambiente para o usuário nas caixas de texto “POTÊNCIA CA”, “POTÊNCIA CC” e “TOTAL Wh”.

Caso o usuário insira algum equipamento de corrente alternada, a caixa de inserção de dados “TENSÃO DE SAÍDA CA“ será habilitada. Nela insere-se o valor de tensão que será utilizada nos equipamentos de corrente alternada que será a tensão de saída do inversor utilizado no sistema.

Caso seja escolhido no ambiente inicial um sistema sem armazenamento de energia, a caixa de inserção de dados “TENSÃO DE TRABALHO“ será habilitada, nela deve-se inserir o valor de tensão do sistema que será o valor entregue a carga ou valor de saída do arranjo fotovoltaico.

O valor apresentado na caixa de texto “TOTAL Wh” é o consumo de energia em (Wh) da carga da instalação, que deve ser um valor positivo, caso o usuário não insira carga na lista de levantamento, este valor irá permanecer igual a zero, assim ao clicar no botão “AVANÇAR“, o sistema irá gerar uma mensagem de erro na inserção da carga instalada, como ilustra a Figura 62.

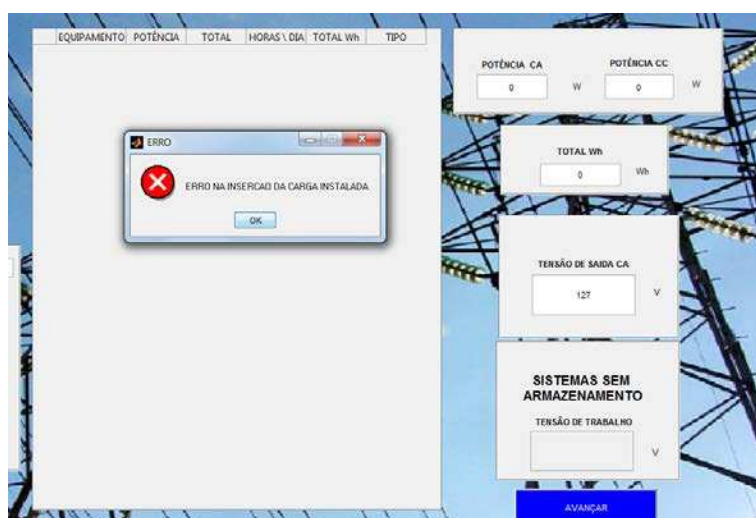



Figura 62 - Mensagem de Erro na Inserção da Carga Instalada.

Para corrigir, basta reconhecer o erro clicando em “OK”, corrigir os dados inseridos e clicar no botão “AVANÇAR“.

4.5 Módulos Fotovoltaicos

Após inserir os dados da carga da instalação, ao avançar, abrirá o ambiente de escolha dos módulos fotovoltaicos, que é apresentado na Figura 63.

Figura 63 - Ambiente de Escolha do módulo Fotovoltaico.

Da mesma forma que são inseridas e removidas as cargas instaladas, é possível construir um banco de dados de módulos fotovoltaicos que estão disponíveis no mercado, podendo adicionar novos modelos e remover modelos obsoletos, adequando os cálculos do *software* com a disponibilidade do mercado.

Para adicionar novos módulos à lista, basta preencher os seus dados no painel “INSERIR MÓDULO“ e clicar no botão “INSERIR“. Para que ele apareça na lista, basta clicar no botão “INICIALIZAR TABELA“. Para remover um módulo da lista, basta inserir o seu número na caixa de texto “Nº“ no painel “REMOVER MÓDULO“ e clicar no botão “REMOVER“, caso o usuário insira um número de módulo que não existe, o sistema envia uma mensagem de erro de equipamento inexistente, como apresenta a Figura 64.

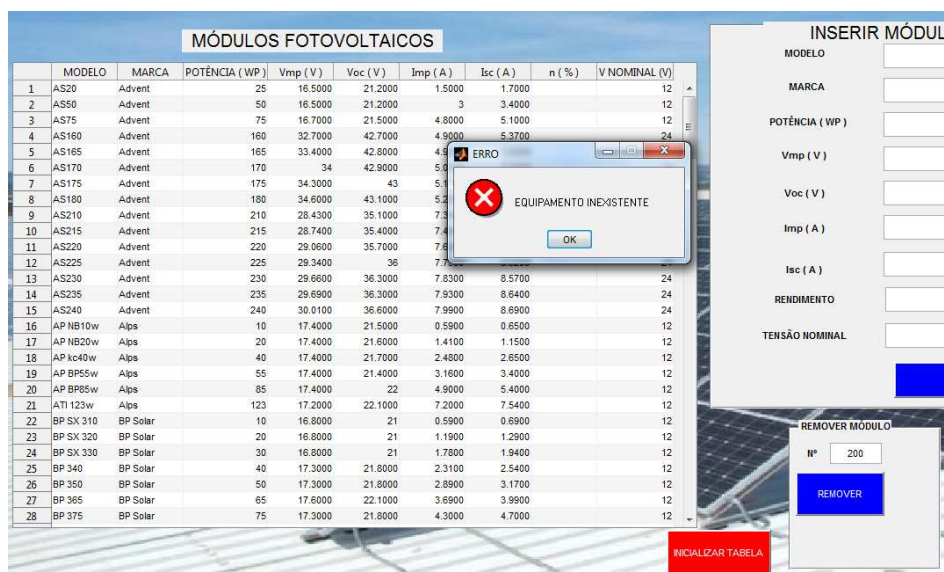



Figura 64 - Mensagem de Erro ao Remover Módulo Inexistente.

O banco de dados dos módulos ficará salvo em um arquivo do *software* e para carregá-lo basta clicar no botão “INICIALIZAR TABELA”. Basta escolher o módulo que será utilizado para o sistema e clicar no botão “AVANÇAR“. Caso o número escolhido não esteja na lista, o sistema envia uma mensagem de erro de número do módulo inválido, como mostra a Figura 65. Inicialmente o *software* conta com um banco de dados de 177 módulos fotovoltaicos.

Figura 65 - Mensagem de Erro ao Selecionar Módulo Inexistente.

Para corrigir, basta reconhecer o erro clicando em “OK“, corrigir os dados inseridos e clicar no botão “AVANÇAR“.

È necessário que o usuário tenha sensibilidade ao escolher o módulo fotovoltaico visando diminuir custos e uma melhor adequação ao sistema que quer desenvolver. Por exemplo, ao escolher uma tensão de trabalho de 24 V, é melhor escolher um modelo de módulo com este mesmo valor de tensão do que escolher um modelo de módulo de 12 V, que seria necessário uma ligação em série.

4.6 Baterias

Após escolher o módulo fotovoltaico usado no sistema, será escolhida a bateria, lembrando que no ambiente inicial, se for selecionado um sistema sem armazenamento, o ambiente de escolha de baterias não aparecerá para o usuário e será direcionado ao próximo passo referente a configuração escolhida.

O ambiente de escolha da bateria é apresentado na Figura 66, da mesma forma que são inseridas e removidas as cargas instaladas e módulos fotovoltaicos, é possível construir um banco de dados de baterias que estão disponíveis no mercado. Sendo possível adicionar novos modelos e remover modelos obsoletos, adequando os cálculos do *software* com a disponibilidade do mercado.

Para adicionar novas baterias à lista, basta preencher os seus dados no painel “INSERIR NOVA BATERIA“ e clicar no botão “INSERIR“. Para que ele apareça na lista, basta clicar no botão “INICIALIZAR TABELA“. Para remover uma bateria da lista, basta inserir o seu número na caixa de texto “Nº“ no painel “REMOVER BATERIA“ e clicar no botão “REMOVER“. Após clicar no botão “INICIALIZAR TABELA“ ela desaparecerá da lista. O valor do coeficiente de auto descarga da bateria inserido do *software* deve ser mensal.

Inicialmente o *software* conta com um banco de dados de 61 baterias.

Figura 66 - Ambiente de escolha da Bateria.

Caso o usuário insira para remover um número de bateria que não conste na lista, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como descreve a Figura 67. Para normalizar, basta clicar em “OK “ na janela e corrigir o dado inválido.

Figura 67 - Mensagem de Erro ao Remover Bateria Inexistente.

É preciso inserir na caixa de texto “TENSÃO DO BANCO“ o valor de tensão escolhido para o banco de baterias que será construído e na caixa de texto “DIAS

DE AUTONOMIA“ a quantidade de dias de autonomia para o sistema em casos de dias chuvosos ou outros imprevistos.

Caso o usuário insira um valor de tensão do banco de baterias igual a zero ou outro valor inválido, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como ilustra a Figura 68. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

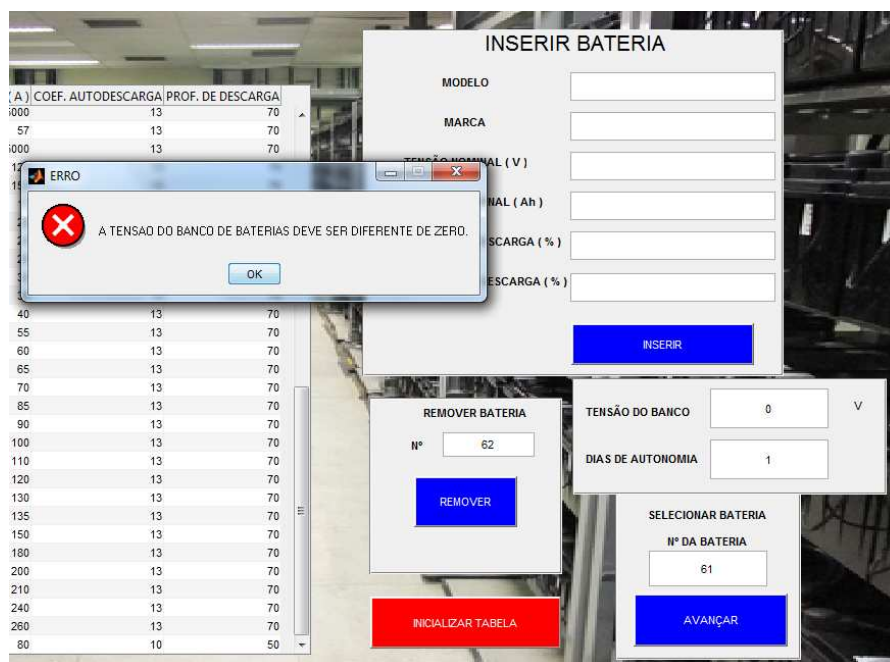



Figura 68 - Mensagem de Erro ao Inserir Tensão do Banco de Baterias inválido.

Caso o usuário insira um número de dias de autonomia do banco de baterias igual a zero ou outro valor inválido, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como ilustra a Figura 69. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

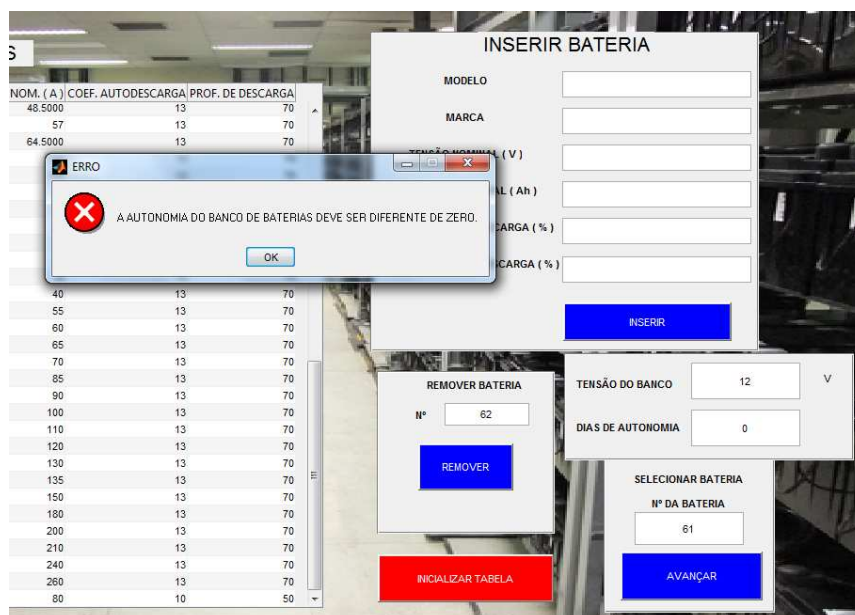



Figura 69 - Mensagem de Erro ao Inserir Dias de Autonomia.

Para concluir, basta inserir na caixa de texto “Nº DA BATERIA“, o número da bateria escolhida e clicar no botão “AVANÇAR“.

Caso o usuário insira como escolha um número de bateria que não conste na lista, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como apresenta a Figura 70. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

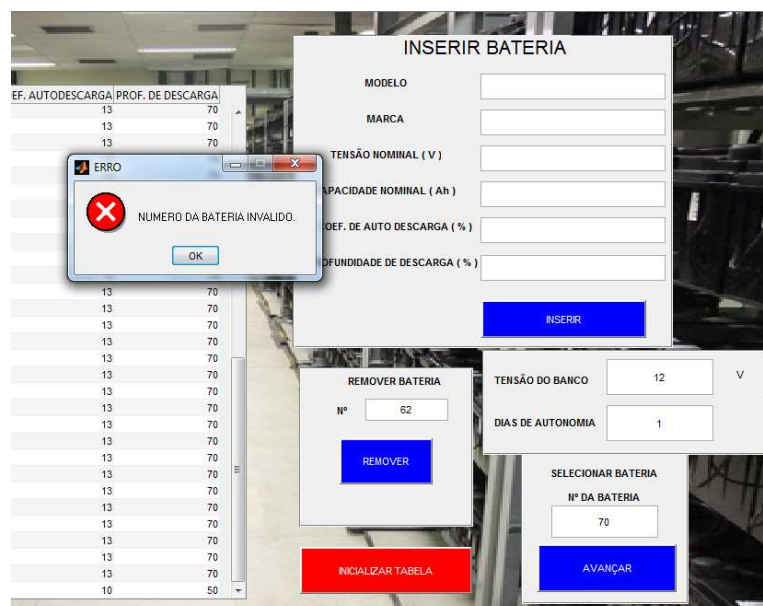



Figura 70 - Mensagem de Erro ao Escolher Número de Bateria inválido.

4.7 Inversores

O ambiente de escolha do inversor é apresentado na Figura 71, sendo que se o sistema não tiver cargas CA, não é necessário escolher inversor, portanto esse ambiente não será apresentado ao usuário. Este ambiente também possui um banco de dados de modelos e suas características salvo no *software*. Para visualizar o banco de dados, basta clicar no botão “ATUALIZAR TABELA“, para alterar o banco de dados, basta clicar no botão “INSERIR\REMOVER INVERSOR“, será aberta uma janela, como a ilustra a Figura 72, onde é possível inserir ou remover modelos da mesma forma que módulos e baterias. Após clicar em “RETORNAR“ a janela será fechada e será preciso clicar no botão “ATUALIZAR TABELA“ para que os dados alterados sejam atualizados. O *software* possui dois bancos de dados para os inversores, sendo um para os inversores comuns utilizados em sistemas autônomos e outro para sistemas conectados a rede elétrica, onde é necessária a utilização de inversores especiais com sincronismo com a rede elétrica convencional. Caso no ambiente inicial o usuário selecione um sistema autônomo, automaticamente o software carrega o arquivo do banco de dados de inversores comuns e se for selecionado um sistema conectado a rede, é carregado o arquivo dos inversores especiais. Inicialmente o *software* conta com um banco de dados de 44 inversores comuns e de 5 especiais.

Figura 71 - Ambiente de Escolha do Inversor.

Figura 72 - Ambiente de Inserir/Remover Inversores.

Caso o usuário insira para remover um número de Inversor que não conste na lista, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como mostra a Figura 73. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

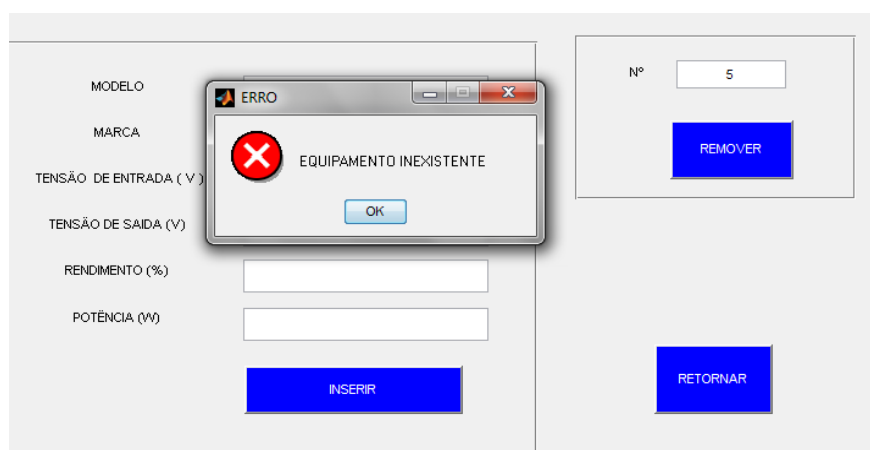



Figura 73 - Mensagem de Erro ao Remover Inversor inválido.

Através dos dados inseridos no levantamento de carga e as definições de tensão do sistema e características da carga (CA ou CC), o *software* calcula as características necessárias do inversor. Os dados de tensão do banco de baterias ou tensão de trabalho, tensão de saída do sistema de corrente alternada e a potência total dos equipamentos CA são apresentadas ao usuário através de caixas de texto no ambiente de escolha do inversor. Com base nessas variáveis, deve-se escolher na lista o inversor, levando em conta que a tensão de entrada do inversor deve ser

compatível com a tensão do banco\trabalho, a tensão de saída do inversor deve ser compatível com a tensão de saída CA e que se a potência do inversor for menor do que a potência total CA, para os sistemas autônomos, será necessária mais de um inversor, por isso deve-se ter uma sensibilidade para sua escolha envolvendo questões de custos para a instalação. Para o caso de sistemas conectados a rede elétrica, a potência do inversor especial deverá ser maior do que a potência máxima de todos os módulos fotovoltaicos juntos. Seleciona-se o número do inversor escolhido e clica-se no botão “AVANÇAR“.

Caso o usuário escolha um número de Inversor que não suporte a tensão de trabalho, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como apresenta a Figura 74. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

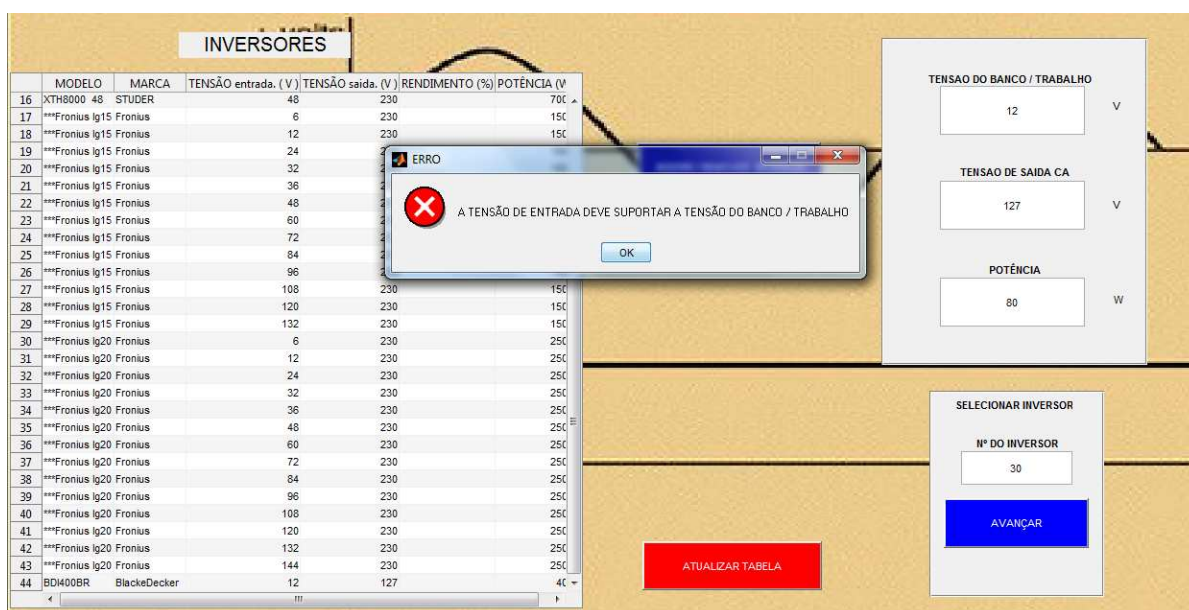



Figura 74 - Mensagem de Erro para Inversor que Não Suporta a Tensão de Trabalho.

Caso o usuário escolha um número de inversor que sua tensão de saída seja diferente da tensão escolhida para o sistema de corrente alternada, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como ilustra a Figura 75. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

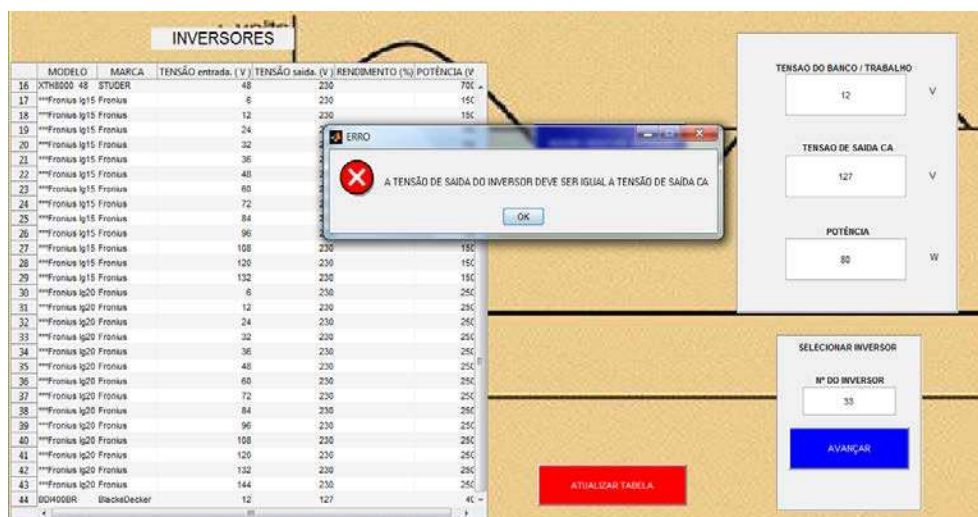



Figura 75 - Mensagem de Erro para Inversor com Tensão de Saída Diferente da Tensão CA.

Caso o usuário escolha um número de inversor que sua potência seja menor que a potência necessária, para sistemas autônomos considerando a margem de segurança de 10%, o sistema envia uma mensagem de AVISO abrindo uma janela, como apresenta a Figura 76, informando que será necessário utilizar mais de um inversor, assim as cargas CA deverão ser divididas entre os inversores. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela que o sistema irá avançar normalmente.

Para os sistemas conectados a rede elétrica, caso a potência do inversor selecionado seja menor do que a potência necessária, o sistema gera uma mensagem de ERRO conforme apresenta a Figura 77 não permitindo o avanço do sistema. Para corrigir, basta clicar em “OK”, selecionar o inversor compatível e clicar no botão “AVANÇAR”.

O usuário deve ter sensibilidade na escolha do inversor levando em conta os dados apresentados, para sistemas autônomos, em casos onde a potência do inversor escolhido for menor que a potência CA, apenas escolhendo outro modelo, poderá não ser necessário utilizar mais de um inversor, o que diminui os custos da instalação.

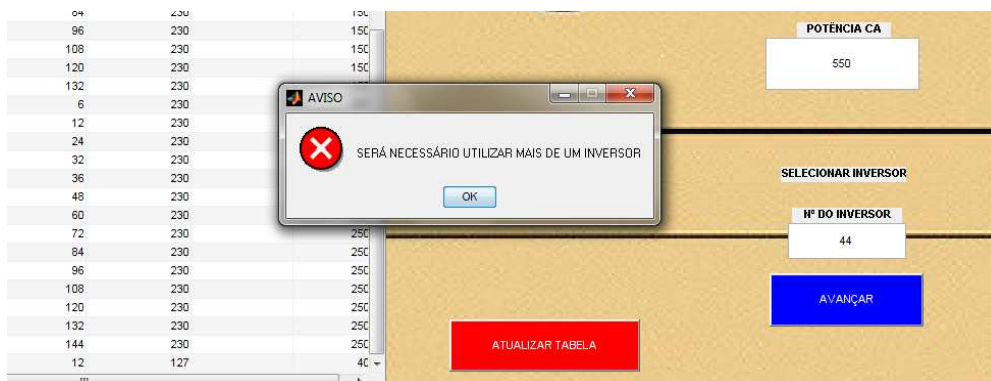



Figura 76 - Mensagem de Aviso para necessidade de mais de um inversor.

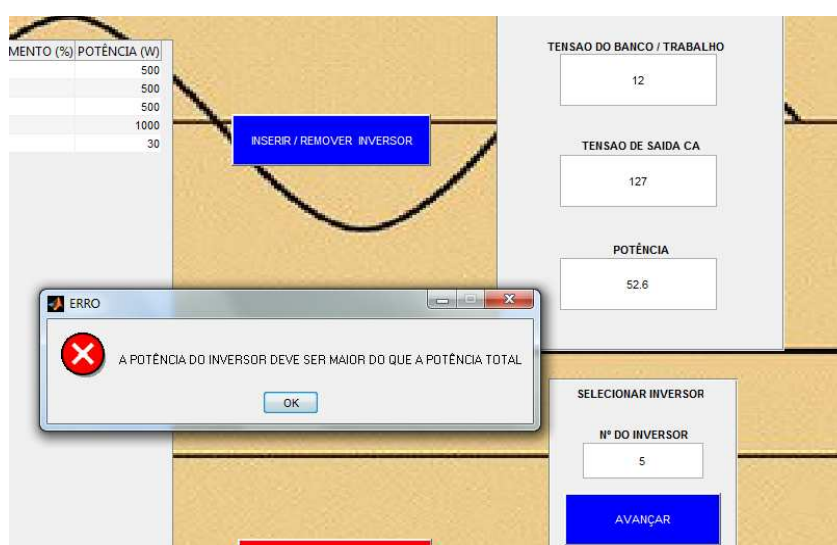



Figura 77 – Mensagem de Erro Para Potência do Inversor Inválida.

Para continuar com o dimensionamento, basta escolher o inversor na lista, inserir seu número na caixa de texto “Nº DO INVERSOR“ no painel “SELECIONAR INVERSOR“ e clicar no botão “AVANÇAR“. Caso o usuário escolha um número de inversor que não conste na lista, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como apresenta a Figura 78. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

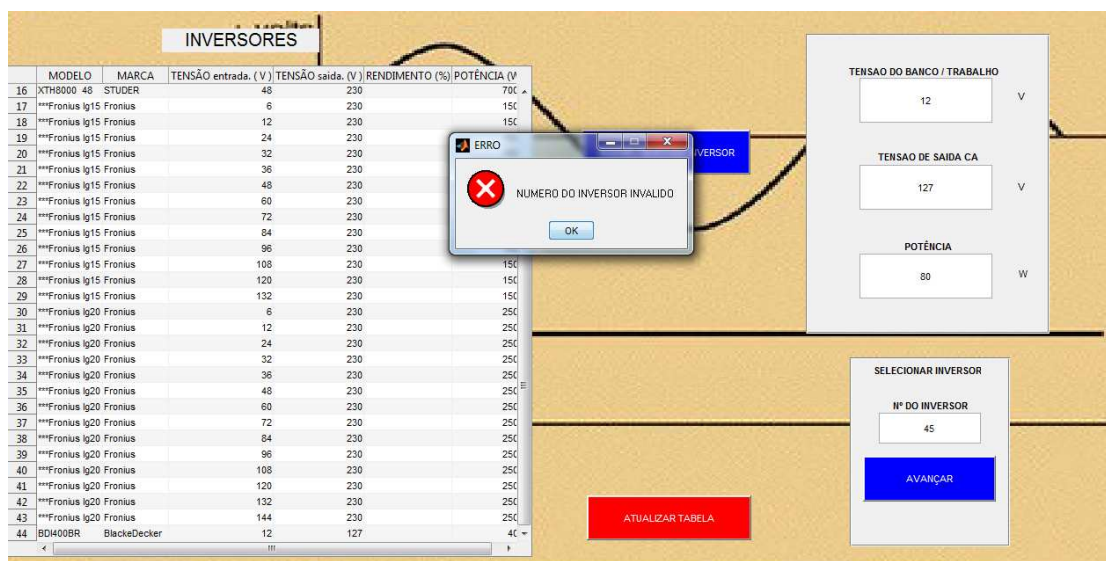



Figura 78 - Mensagem de Erro para número de Inversor Escolhido Inválido.

4.8 Controladores de Carga

O próximo ambiente é o da escolha do controlador de carga, que é apresentado na Figura 79. Ele também possui um banco de dados de modelos e características de controladores do mercado salvo num arquivo do *software*. Para visualizar o banco de dados, basta clicar no botão “INICIALIZAR TABELA“. Para alterar o banco de dados, basta clicar no botão “INSERIR\REMOVER CONTROLADOR“ e será aberta uma janela, como ilustra a Figura 80, onde é possível inserir ou remover modelos da mesma forma que módulos e baterias. Após clicar em “RETORNAR“ a janela será fechada e será preciso clicar no botão “INICIALIZAR TABELA“ para que os dados alterados sejam atualizados.

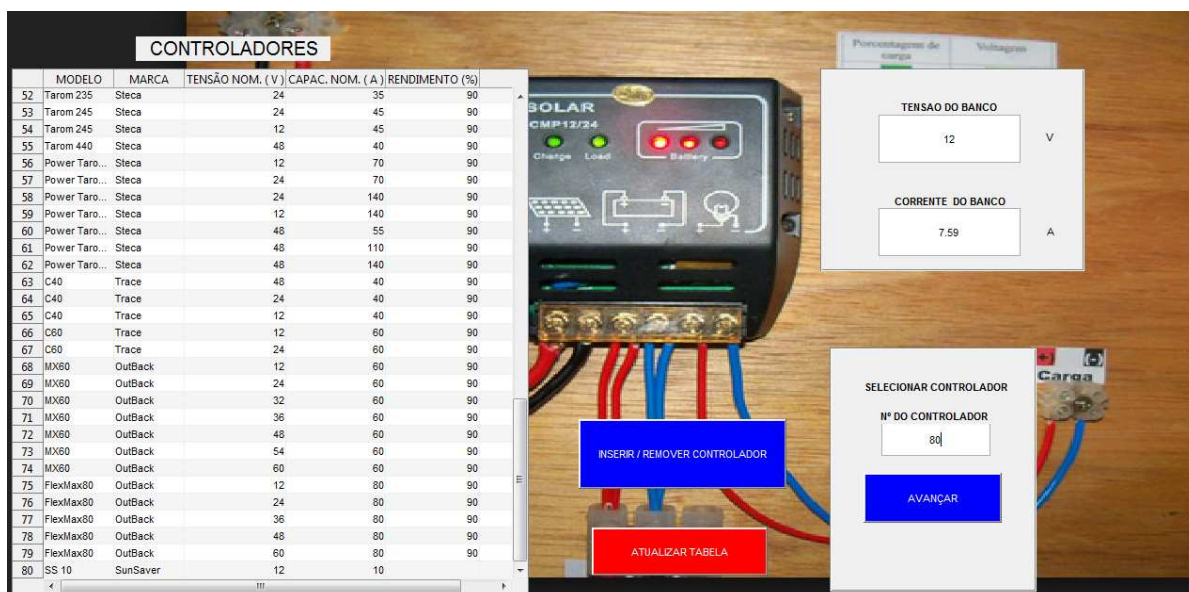



Figura 79 - Ambiente de Escolha do Controlador de Carga.

Figura 80 - Ambiente de Inserir/Remover Controladores.

Caso o usuário insira para remover um número de controlador que não conste na lista, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como apresenta a Figura 81. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

Figura 81 - Mensagem de Erro ao Remover Controlador inválido.

No ambiente de escolha do controlador, os valores de tensão do banco de baterias e a corrente máxima são apresentados para o usuário nas caixas de texto “TENSÃO DO BANCO“ e “CORRENTE DO BANCO“, com base nestes valores, o usuário deve escolher o controlador de modo que sua tensão nominal seja compatível com a tensão do banco de baterias e que se sua capacidade de corrente for menor do que a corrente do banco de baterias será necessária mais de um controlador. Escolhe-se o número do controlador e clica-se no botão “AVANÇAR“.

Caso o usuário escolha um número de controlador que sua tensão nominal seja diferente da tensão do banco de baterias, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como mostra a Figura 82. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido. Como muitos controladores de carga possuem uma seleção da tensão de entrada, o usuário deve possuir essa informação e inserir na lista de controladores o valor que ele quiser optar.

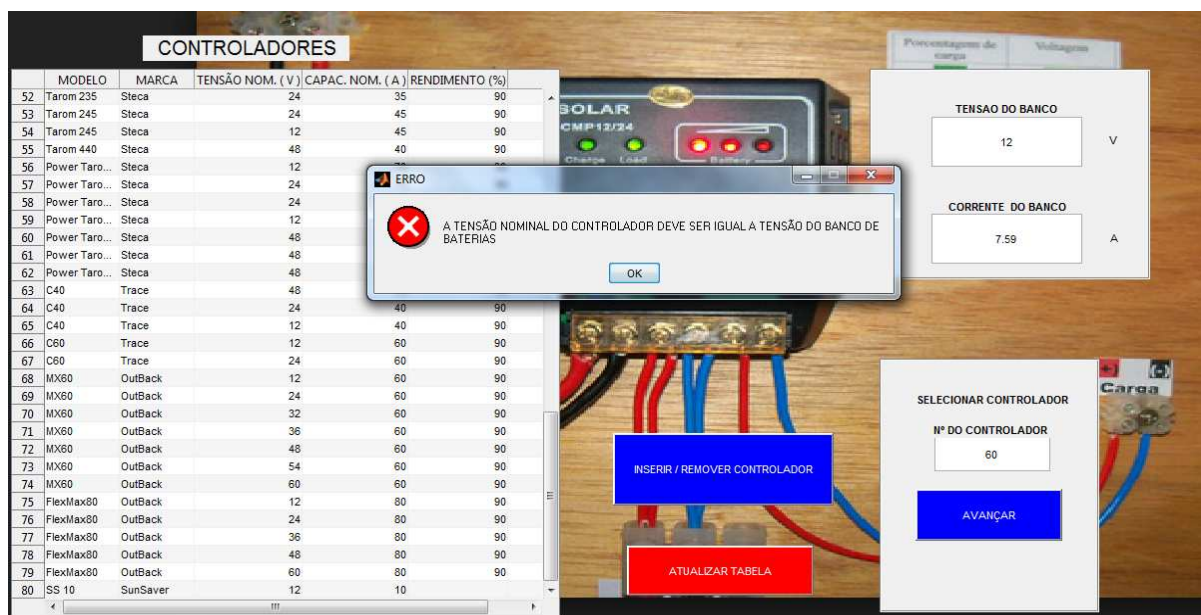



Figura 82 - Mensagem de Erro para Controlador com Tensão Nominal Diferente da Tensão Exigida.

Caso o usuário escolha um número de controlador que sua capacidade de corrente seja menor que corrente máxima gerada pelos módulos, considerando a margem de segurança de 10%, o sistema envia uma mensagem de AVISO abrindo uma janela, como ilustra a Figura 83, informando que será necessário utilizar mais de um controlador, assim os módulos devem ser divididos entre os controladores. Para normalizar, basta clicar em "OK" na janela que o sistema irá avançar normalmente. O usuário deve ter sensibilidade na escolha do controlador levando em conta os dados apresentados, em casos onde a corrente do controlador escolhido for menor que a corrente do conjunto de módulos, apenas escolhendo outro modelo, poderá não ser necessário utilizar mais de um controlador, o que diminui os custos da instalação.

Figura 83 - Mensagem de Aviso para Necessidade de Mais de Um Controlador da Carga.

Para continuar com o dimensionamento, basta escolher o controlador na lista, inserir seu número na caixa de texto “Nº DO CONTROLADOR“ no painel “SELECIONAR CONTROLADOR“ e clicar no botão “AVANÇAR“. Caso o usuário escolha um número de controlador que não conste na lista, o sistema envia uma mensagem de erro abrindo uma janela, como apresenta a Figura 84. Para normalizar, basta clicar em “OK“ na janela e corrigir o dado inválido.

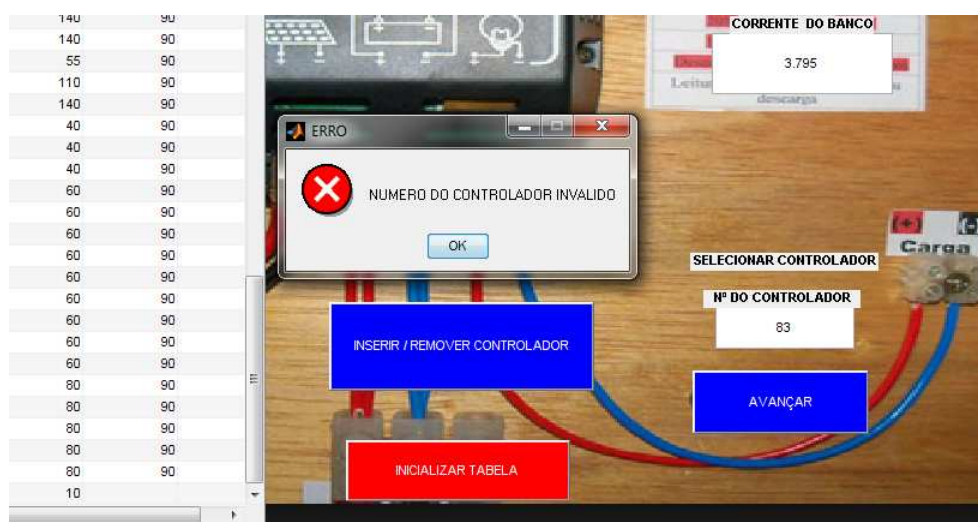



Figura 84 - Mensagem de Erro para número de Controlador Escolhido Inválido.

4.9 Relatório Final

Após inserir todos os equipamentos e dados necessários para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, é aberto o ambiente final, ilustrado na Figura 85, onde são apresentados todos os dados do sistema.

Figura 85 - Ambiente Final – Relatório de todos os dados do Sistema.

É preciso clicar no botão “GERAR RELATÓRIO“, assim todos os dados serão calculados pelo *software* e apresentados ao usuário. São apresentados os dados do módulo escolhido, sua quantidade total requerida, e a quantidade de módulos em série e em paralelo. São listados os dados da bateria escolhida, sua quantidade total requerida e a quantidade de baterias em série e paralelo, os dados do inversor escolhido e a quantidade requerida, os dados do controlador escolhido e a quantidade requerida, os meses selecionados no inicio e os valores de radiação e insolação média, a energia total requerida.

Ao clicar no botão “CARGA INSTALADA“, será aberta uma janela, como mostra a Figura 86, com a tabela de carga inserida na janela de levantamento de carga.

	EQUIPAMENTO	POTÊNCIA	TOTAL	HORAS \ DIA	TOTAL Wh	TIPO
1	Lampada incand.	40	2	3	240	CA
2	Fita LED	16	2	3	96	CC

Figura 86 - Relatório da Carga Instalada Inserida Pelo Usuário.

Ao clicar na janela “ESQUEMA DE LIGAÇÃO“, será aberta uma janela com a figura do esquema de ligação dos equipamentos do sistema similar ao real que obedece a seguinte ordenação:

A Figura 87 ilustra o esquema de um sistema autônomo com armazenamento CA e CC com mais de um controlador.

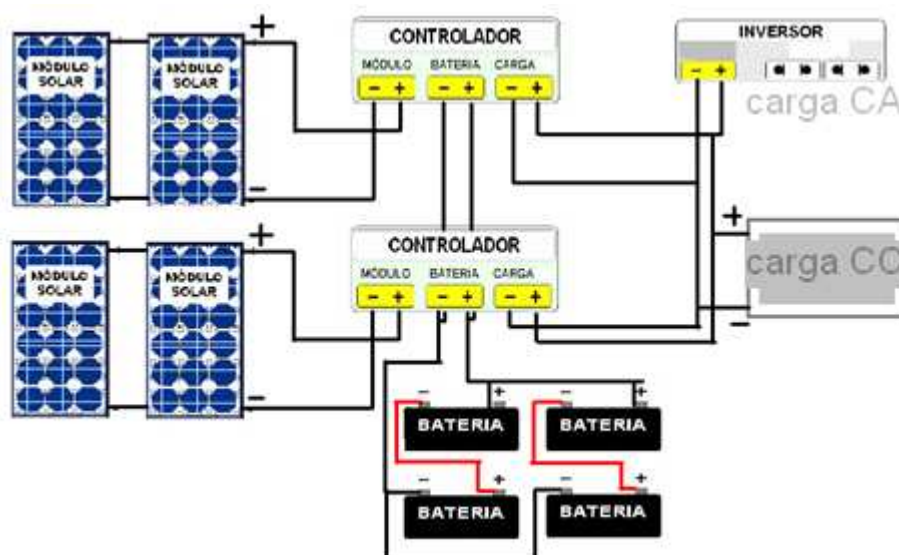



Figura 87 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CA e CC com mais de um controlador.

A Figura 88 apresenta o esquema de um sistema autônomo com armazenamento CA e CC com um controlador.

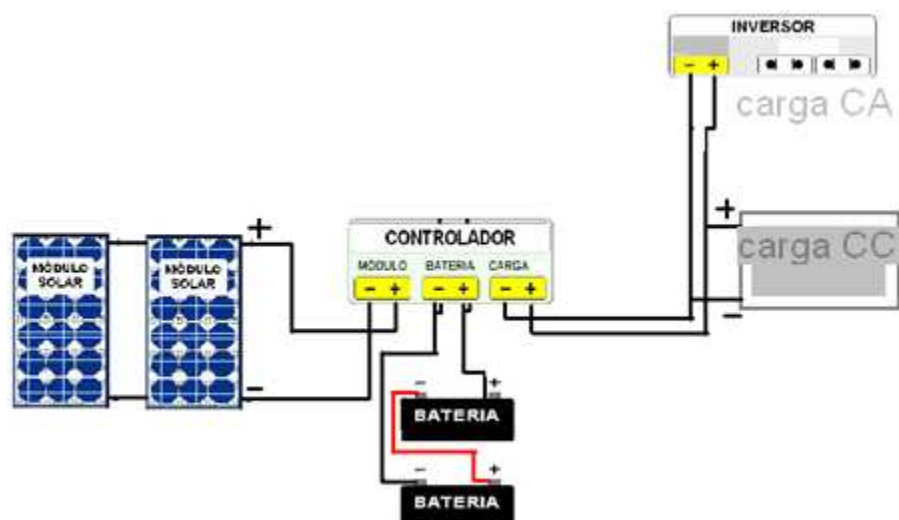



Figura 88 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CA e CC com um controlador.

A Figura 89 descreve o esquema de um sistema autônomo com armazenamento CC com mais de um controlador.

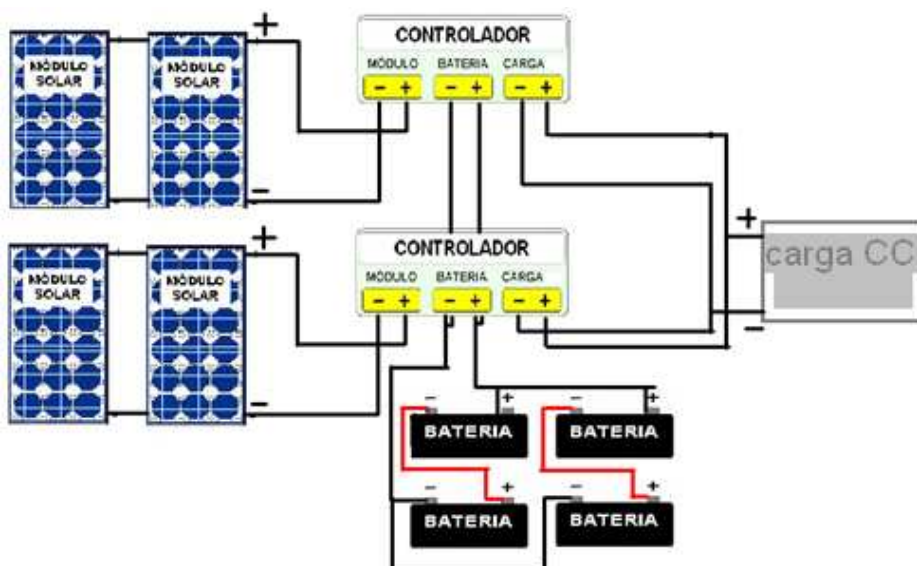



Figura 89 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CC com mais de um controlador.

A Figura 90 apresenta o esquema de um sistema autônomo com armazenamento CC com um controlador.

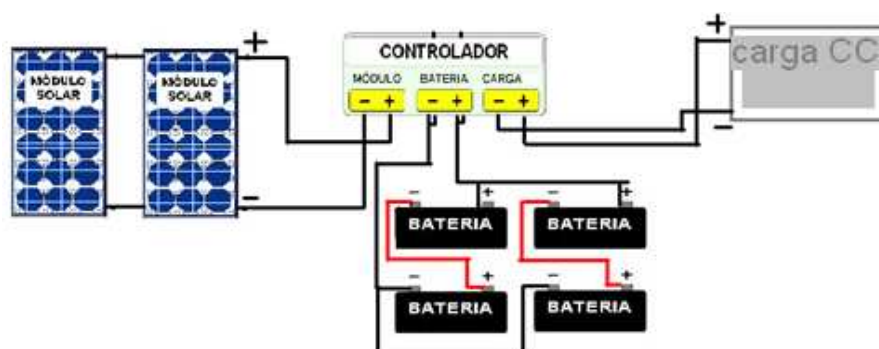



Figura 90 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CC com um controlador.

A Figura 91 ilustra o esquema de um sistema autônomo com armazenamento CA com mais de um controlador.

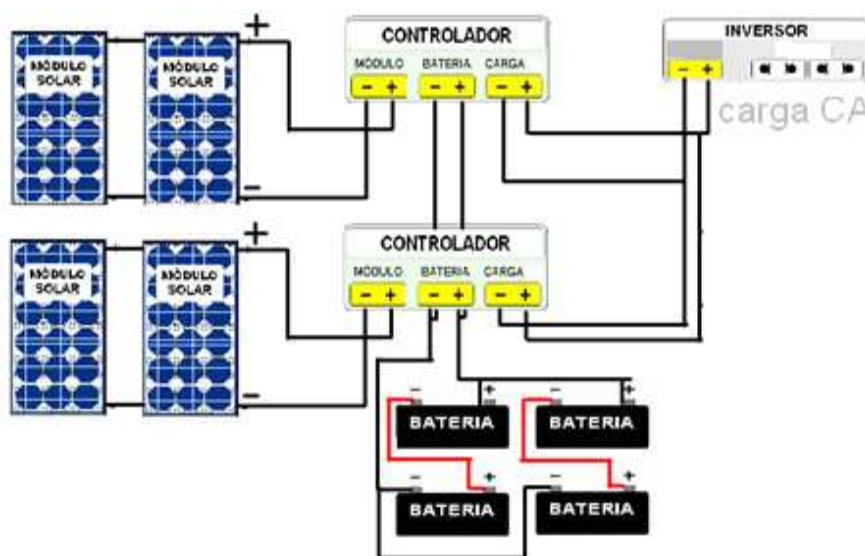



Figura 91 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CA com mais de um controlador.

A Figura 92 descreve o esquema de um sistema autônomo com armazenamento CA com um controlador.

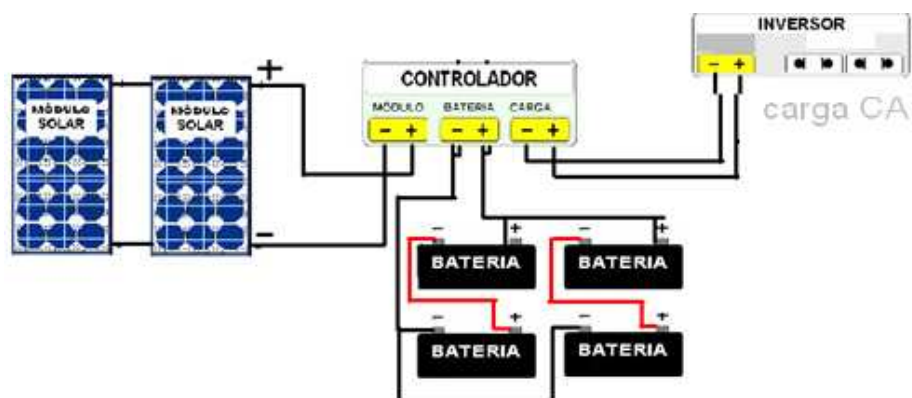



Figura 92 - Esquema de um Sistema autônomo com armazenamento CA com um controlador.

A Figura 93 apresenta o esquema de um sistema autônomo sem armazenamento CA e CC.

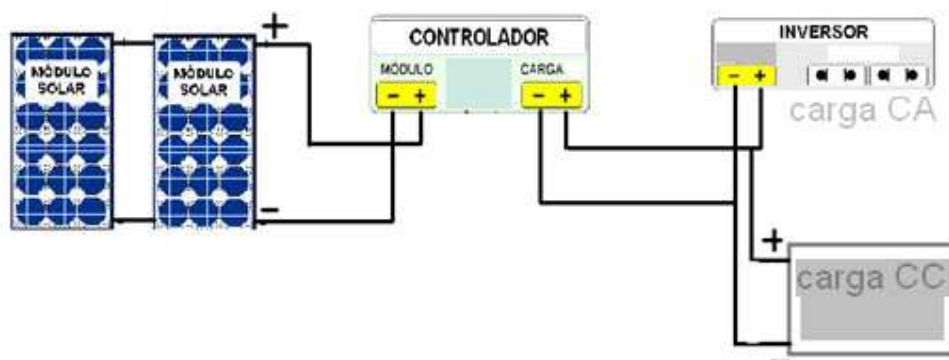



Figura 93 - Esquema de um Sistema autônomo sem armazenamento CA e CC

A Figura 94 ilustra o esquema de um sistema autônomo sem armazenamento CC.

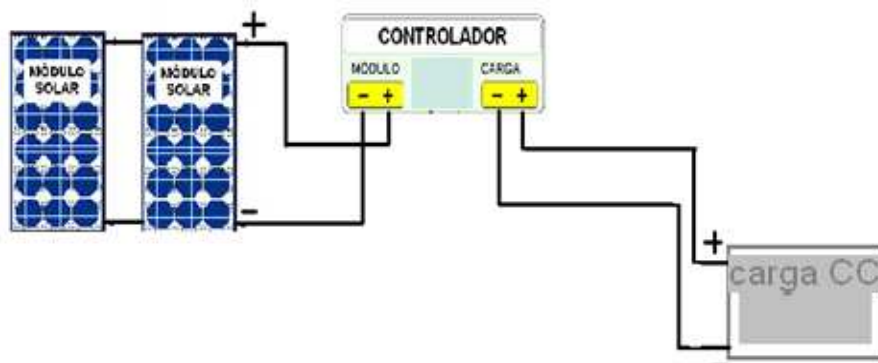



Figura 94 - Esquema de um Sistema autônomo sem armazenamento CC.

A Figura 95 descreve o esquema de um sistema autônomo sem armazenamento CA.

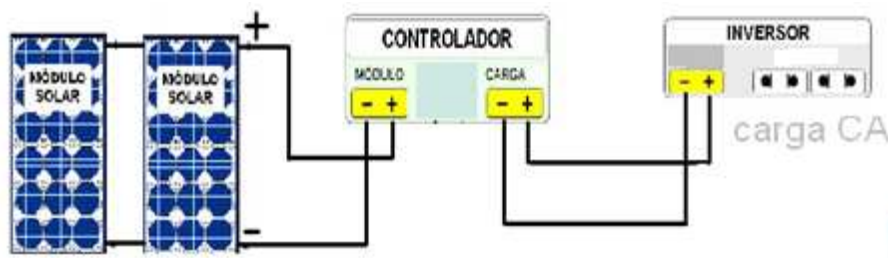



Figura 95 - Esquema de um Sistema autônomo sem armazenamento CA.

Para os sistemas fotovoltaicos interligados a rede elétrica pública, não há a necessidade de armazenamento, a própria rede pública funcionará como se fosse um banco de baterias. Quando o imóvel estiver gerando energia, ele injetará a energia gerada na rede pública e quando for consumir energia, esta será consumida da rede pública, assim a energia gerada e a consumida são medidas através de medidores sendo calculada a diferença entre estas medições para faturamento da concessionária de energia elétrica. Para o dimensionamento de sistemas interligados a rede, o *software* considera apenas consumo de corrente alternada, caso seja necessário utilizar equipamentos CC, é preciso utilizar uma fonte de conversão CA-CC.

Ao selecionar no ambiente inicial um sistema conectado a rede elétrica, é possível visualizar na caixa de texto “ENERGIA MENSAL PRODUZIDA” a quantidade de energia em (kWh) que será gerada mensalmente pelo sistema fotovoltaico dimensionado de acordo com a região de instalação do sistema. Isto é muito importante para sistemas conectados a rede, pois com a possibilidade da mini e micro produção, é possível “vender” energia elétrica para as concessionárias de energia recebendo créditos energéticos, assim saber o quanto é possível produzir é fundamental. Os sistemas fotovoltaicos possuem custo elevado, portanto é muito interessante estimar em quanto tempo pode-se recuperar o investimento em um sistema fotovoltaico micro ou mini produtor, assim pode-se pagar o investimento feito através da economia nos gastos com energia elétrica havendo a possibilidade de ser auto-suficiente na geração de energia.

Ao selecionar um sistema interligado a rede, é habilitado no ambiente final o botão “RETORNO DO INVESTIMENTO” onde ao clicar, é aberto o ambiente mostrado na Figura 96.

Figura 96 – Ambiente de Cálculo do Retorno do Investimento.

Neste ambiente é possível, de uma forma bem simplificada, estimar o numero de meses necessários para que a economia gerada pela instalação de um sistema fotovoltaico interligado a rede elétrica convencional pague o investimento inicial para a compra do sistema. Para isto basta inserir no campo “PREÇO DO kWh” o valor do kWh da região onde o sistema será instalado que pode ser verificado na conta mensal de energia elétrica, para a micro ou mini geração, a concessionária de energia elétrica deve “pagar” ao produtor o mesmo valor que cobra pelo consumo. Também é preciso inserir o custo total do investimento em (R$) e clicar no botão “CALCULAR”, assim é possível observar no campo “Nº DE MESE PARA RETORNO” o tempo necessário para que o investimento seja pago. para encerrar, basta clicar no botão “FECHAR”.

A Figura 97 apresenta o esquema de um sistema interligado a rede elétrica:

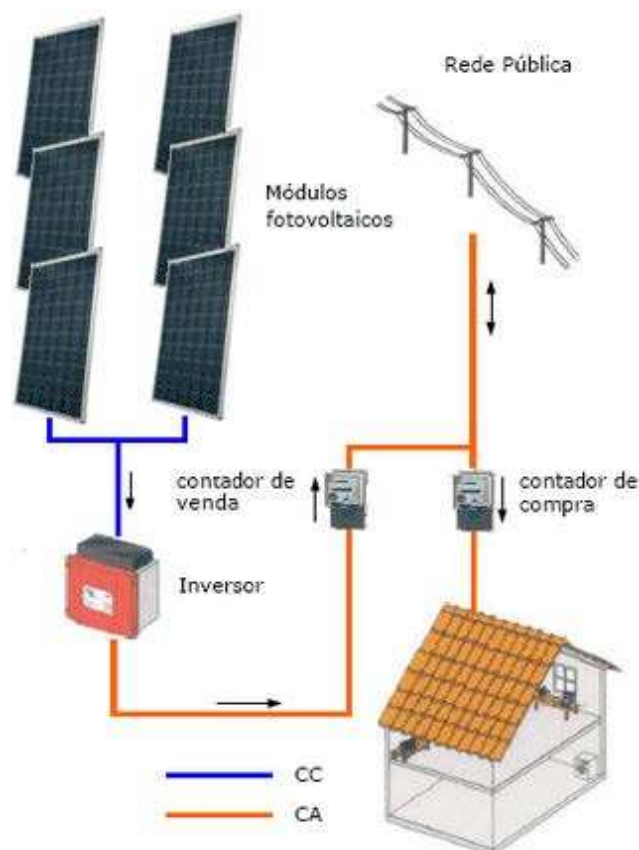



Figura 97 - Esquema de um Sistema interligado a rede elétrica.

Este software não dimensiona os condutores da instalação, sendo necessário utilizar a norma ABNT (NBR5410) para adequar as instalações elétricas. No ambiente do relatório final existe um aviso e ao clicar no botão “NBR5410”, será aberto um arquivo contendo a norma NBR5410 para consulta.

O ambiente final apresenta ao usuário o ângulo ideal para a inclinação do conjunto fotovoltaico em relação a horizontal. O usuário deve orientar o conjunto para a direção norte se o sistema estiver instalado no hemisfério sul ou para a direção sul se o sistema estiver instalado no hemisfério norte, para isso pode-se utilizar uma bússola para encontrar a direção correta. Devido as linhas do campo magnético terrestre não serem perfeitamente direcionadas, é preciso fazer uma correção na direção indicada pela bússola, ao clicar no botão “NORTE REAL”, será aberta uma janela conforme ilustra a figura 98 com um mapa de correção da direção indicada pela bússola, assim basta acrescentar o ângulo correspondente a direção indicada para encontrar a direção do norte geográfico.

Figura 98 – Mapa de Ângulo de Correção da Direção Norte.

(Fonte: Marcelo Gradella Villalva – 2012)

4.10 Bloqueios de Dados Incoerentes

O *software* possui diversos bloqueios que impedem que o usuário insira dados incompatíveis ou faça escolhas equivocadas. Para isso o *software* pode não avançar para o próximo ambiente e gerar avisos de erros que aparecem imediatamente para o usuário, como ilustra a Figura 99.

Figura 99 - Mensagem de Erro para Dados Incoerentes.

5 VALIDAÇÃO

O *software* FOTOGERA foi criado em uma base teórica, portanto é preciso validar os seus cálculos. Para a validação foi realizada uma montagem prática de um sistema fotovoltaico autônomo com armazenamento de energia e com cargas CA e CC.

5.1 Escolha da Configuração Básica

Para a configuração básica do sistema fotovoltaico de validação, foi escolhido um sistema autônomo com armazenamento com cargas CA e CC. Essa configuração é a mais comumente instalada em sistemas autônomos e a mais adequada para uma validação, visto que possui todos os componentes de um sistema fotovoltaico.

5.2 Recurso Solar

O sistema fotovoltaico foi instalado no município de SERRA, no estado do ESPÍRITO SANTO, que está localizado a uma latitude de aproximadamente 20º, portanto os dados de insolação e radiação devem ser selecionados para esta localidade. O sistema foi testado no mês de março de 2013, assim, este foi o mês selecionado no *software* como mês de utilização do sistema. Os dados de radiação solar e insolação diária foram verificados no mapa solar do mês de março e inseridos no *software*. O sistema montado não possui controlador com MPPT.

5.3 Escolha da Carga Instalada

O *software* FOTOGERA foi utilizado para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico de teste para atender a demanda de carga instalada apresentada na

Tabela 1. Foi escolhida a tensão de saída CA igual a 127 V, esta é a tensão que alimenta as lâmpadas incandescentes que compõe o sistema CA.

Tabela 1 - Carga Instalada para Teste.

Equipamento	Potência	Quantidade	Tipo	Horas/dia
Lâmp. Incan.	40 W	2	CA	3
Fita LED	16 W	2	CC	3

5.4 Escolha do Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico utilizado na montagem do sistema fotovoltaico é descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Módulo Fotovoltaico para Validação.

Marca	Modelo	Pmax	Vmp	Voc	Imp	Isc
Solarex	MSX53	52.6 W	16.7V	20.5 V	3.16 A	3.45 A

5.5 Escolha da Bateria

A bateria utilizada para a montagem do sistema fotovoltaico de validação é descrita na Tabela 3. Foi escolhido a tensão do banco de baterias igual a 12 V e o número de dias de autonomia do sistema igual a 1 dia para uma profundidade de descarga de 50%.

Tabela 3 - Bateria Escolhida para Validação.

Marca	Modelo	Capac.	Tensão	Coef. Aut. d	Prof. Desc.
Power Kingdow	PK 80	80 A	12 V	10 %	50%

5.6 Escolha do Inversor

O inversor escolhido para a montagem do sistema fotovoltaico de validação é descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Inversor Escolhido para Validação.

Marca	Modelo	Tens. *IN*	Tens. *OUT*	Potência
Black&Decker	BDI400-BR	12 V	127 V	400 W

5.7 Escolha do Controlador de Carga

O controlador de carga escolhido para a montagem do sistema fotovoltaico de validação é descrito na tabela 5.

Tabela 5 - Controlador de Carga Escolhido para Validação.

Marca	Modelo	Tensão	Capacidade
Sun Saver	SS10L	12 V	10 A

5.8 Resultados

Os dados do sistema fotovoltaico para validação foram inseridos no FOTOGERA. Segundo os cálculos do *software* foram necessários dois módulos fotovoltaicos do modelo escolhido ligados em paralelo. Os módulos foram montados orientados para o norte geográfico com a ajuda de uma bússola e conforme calculado pelo *software*, com uma inclinação de 30º em relação a horizontal. Para a autonomia escolhida de

1 dia e a tensão do banco de 12 V, foi necessário apenas uma bateria do modelo selecionado.

O inversor selecionado cumpre os requisitos necessários para ser instalado neste sistema, sendo a tensão de entrada do inversor igual a tensão do banco de baterias, a tensão de saída do inversor é igual a tensão do sistema de alimentação CA escolhido. A potência do inversor é maior que a potência das cargas CA mais as perdas, portanto foi necessário apenas um inversor do modelo escolhido.

O controlador de carga selecionado cumpre os requisitos para ser instalado no sistema, sendo a tensão de trabalho compatível com a tensão gerada pelos módulos fotovoltaicos e com a bateria, sua capacidade é maior do que a capacidade máxima do sistema ais as perdas, portanto foi necessário apenas um controlador de carga.

O esquema elétrico do sistema fotovoltaico montado para validação é apresentado na Figura 100.

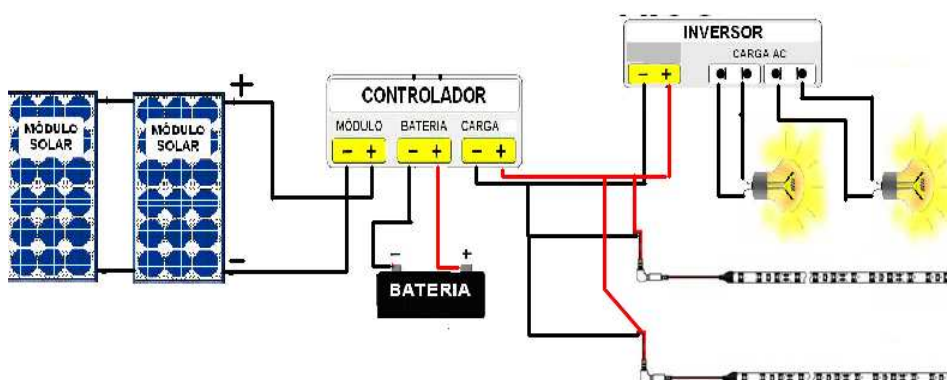



Figura 100 – Esquema elétrico do Sistema Fotovoltaico de Validação.

A Figura 101 apresenta o relatório final gerado do sistema fotovoltaico de validação.

Figura 101 – Relatório Final do Sistema Fotovoltaico de Validação.

A Figura 102 apresenta o modelo do módulo fotovoltaico utilizado para os testes.

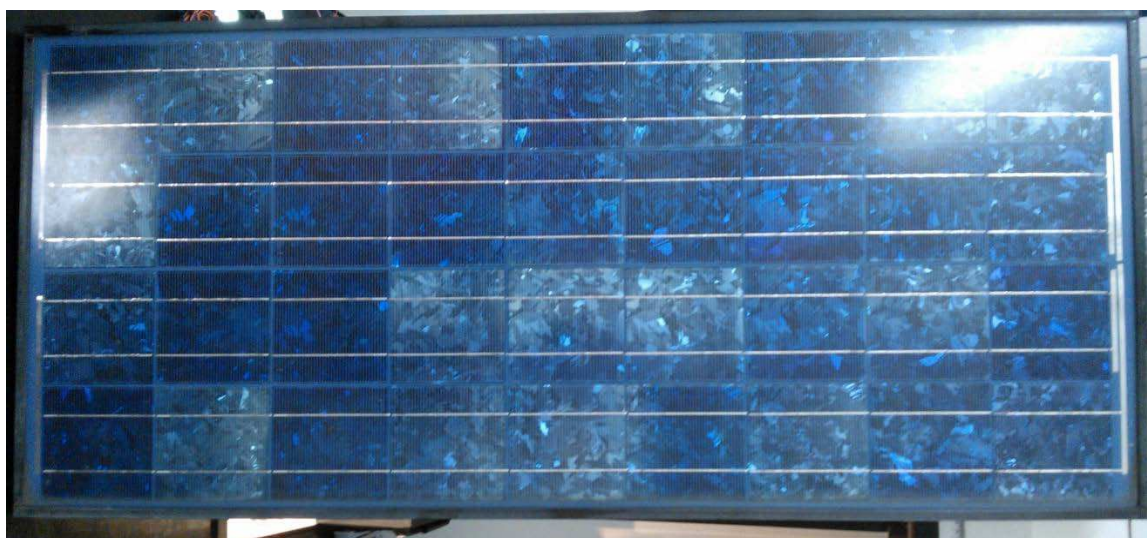



Figura 102 – Módulo Fotovoltaico do Sistema de Validação.

A figura 103 apresenta os demais componentes do sistema fotovoltaico de validação montados em funcionamento.

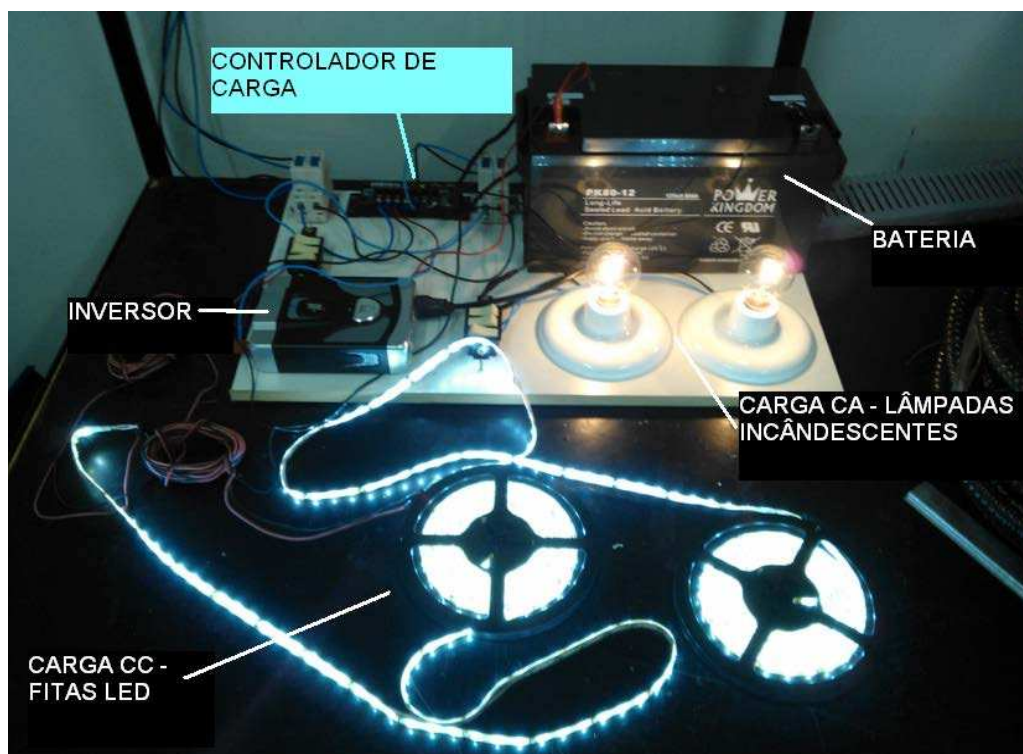



Figura 103 – Sistema Fotovoltaico de Validação.

O sistema foi testado, apresentando uma autonomia de 4 horas, assim ele cumpre a autonomia de 1 dia que equivale a 3 horas de funcionamento das cargas instaladas para uma profundidade de descarga de 50%. Após este período, o controlador de carga bloqueia o fornecimento de energia para as cargas. Foram feitos diversos testes diários simulando a situação de funcionamento normal do projeto do sistema fotovoltaico, sendo as cargas ligadas por 3 horas diárias. O sistema apresentou um funcionamento normal e se encontra operacional. Conclui-se que os dados calculados pelo FOTOGERA estão de acordo com o funcionamento real de um sistema fotovoltaico, assim esta ferramenta pode ser utilizada para o dimensionamento destes sistemas apresentando um resultado satisfatório.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

As atuais formas de produção de energia, como o petróleo, gás e carvão, poluem o meio ambiente e alteram o clima do planeta, além de que são esgotáveis. Apesar de o Brasil possuir uma imensa capacidade de geração de energia em centrais hidrelétricas, é necessário aproveitar o imenso potencial de geração de energia solar, que aliada as questões ambientais, vem crescendo rapidamente afim de substituir as atuais fontes energéticas. Para que essa matriz energética cresça mais rapidamente, são necessárias soluções que incentivem seu uso. O *software* FOTOGERA é uma solução que possibilita uma forma fácil de dimensionar estes sistemas, contribuindo para que a utilização da geração fotovoltaica cresça mais intensamente. Com uma interface interativa, ele não transparece a complexa tarefa de dimensionar um sistema fotovoltaico, além de possuir um baixo custo.

É preciso que ferramentas como este *software* seja mais utilizada no meio acadêmico, em pesquisa e desenvolvimento, para que sejam cada vez mais aperfeiçoados, atingindo plenamente seus objetivos.

Recomenda-se um estudo de viabilidade técnica e econômica para a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências.

Sugere-se como continuidade deste trabalho a inserção do dimensionamento de condutores e proteções, inserção e atualização dos preços de componentes do sistema, e aumentar o bloqueio contra dados incoerentes inseridos pelo usuário.

O *software* é uma versão básica e pode ser complementada. Seus critérios são suficientes para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, apresentando um resultado satisfatório.

REFERÊNCIAS

1 CRESESB/CEPEL; “**Sistemas Fotovoltaicos: Manual de Engenharia**”, Brasil, 1995.

2 CRESESB/CEPEL; “**Energia Solar Princípios e Aplicações**“, PROODEM, 2004.

3 ANEEL- **Agência Nacional de Energia Elétrica**.

4 FREITAS, Susana Sofia Alves; “**Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos**“, Dissertação de Mestrado, 2008.

5 CEPEL/ELETROBRAS; “**Atlas Solarimétrico do Brasil**”, Pernambuco, 2000.

6 AZEVEDO, Marco Antonio de Menezes; “**Proposta de procedimento para dimensionamento de sistemas de geração fotovoltaico**”, Dissertação de Mestrado, Itajubá, 2008.

7 PALZ, W. “**Energia solar e fontes alternativas**“. São Paulo: Hemus, 1981.

8 VERA, LH; “**Programa Computacional para Dimensionamento e Simulação de Sistema Fotovoltaicos**”, dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2004.

9 LOPES, Julio Igor Seguel; “**Projeto de um Sistema Autônomo de Suprimento de Energia**”, Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, 2009.

10 PAREJA, Miguel Aparicio; “**Energia Solar Fotovoltaica, Cálculo de uma Instalación Aislada**“, Editora Marcombo, 2010.

11 CARNEIRO, Joaquim; “**Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos**“,Dissertação de Mestrado, 2009.

12 MASTERS, G.M; **Renewable and Efficient Electric Power systems** – Library of Congress – New Jersey – 2004.

13 JOÃO, Usberco et al , Química Geral Vol.1 – Editora Saraiva -1996.

14 Florida Solar Energy Center, “Photovoltaic System Design - Course Manual”, FSEC-GP-31-86, 1991.

15 “http://eficienciaenergtica.blogspot.com.br/2010_06_01_archive.html“, acesso em fevereiro de 2013.

16 GRADELLA, Marcelo Villalva; “ **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações**” Editora Érica, 2012.